AUGUST 2004 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

> Olympia: Sport und Technik

> Wölfe im Yellowstone-Park

> Die Krux mit dem Sex

> Mathematik: Emmy Noether

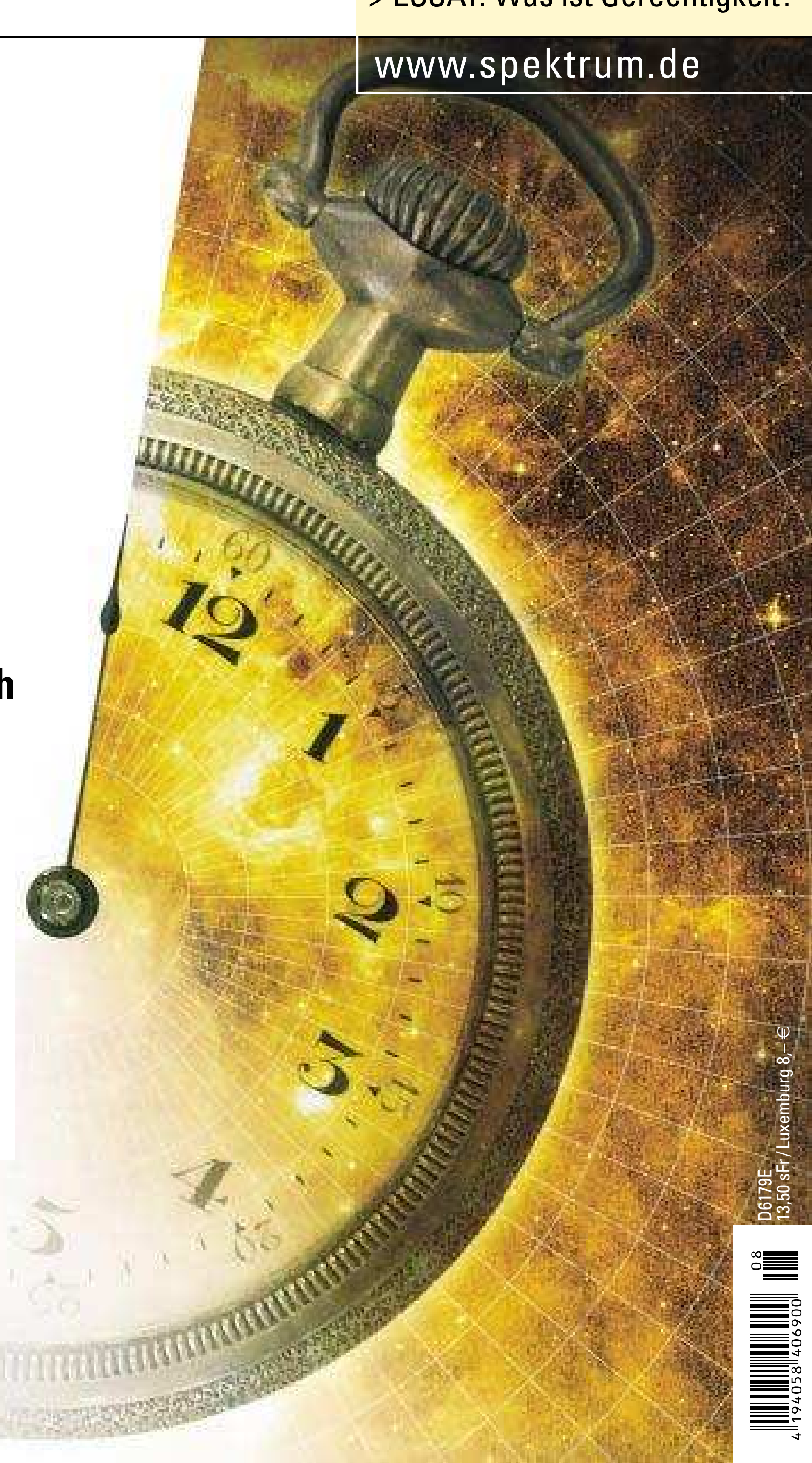
> ESSAY: Was ist Gerechtigkeit?

www.spektrum.de

KOSMOLOGIE

Die Zeit vor der ZEIT

Der Urknall war womöglich nicht der Beginn von allem



MEDIZIN

Was tun bei Kreislaufschock?

MASSENSTERBEN

Streit um das Ende der Dinosaurier

D6179E
13,50 sFr / Luxemburg 8,– €
4 194058 406900 08



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Verbotene Fragen

Wussten Sie, dass sich einige Arten von Rädertieren seit 70 Millionen Jahren überaus erfolgreich vermehren – ungeschlechtlich? Warum sie nicht längst von der Bildfläche verschwanden, ist durchaus ein Rätsel. In dem Artikel »Die Krux mit dem Sex« auf Seite 58 werden jedenfalls die sonst gepriesenen evolutionären Vorzüge sexueller Reproduktion kritisch unter die Lupe genommen.

In der Schule habe ich noch gelernt: Mit geschlechtlicher Fortpflanzung können schlechte Mutanten wirksamer zurückgedrängt und neue Genvarianten leichter hervorgebracht werden. Aber offenbar ist es keineswegs so offensichtlich, dass Reproduktion per Sex ihren Alternativen immer überlegen ist. Von »einer der heikelsten Fragen der Biologie« spricht denn auch der kalifornische Biologe Christopher Wills und führt »über dreißig Hypothesen« an, die derzeit miteinander konkurrieren. Keine Sorge: Es geht beim Thema Sex, wie auch sonst in diesem Magazin, um seriöse Fragen, die vielleicht nur nicht so häufig gestellt werden.

Als ein absolutes Tabu galt bis vor wenigen Jahren beispielsweise die Frage, was vor dem Urknall gewesen sei. Im kosmischen Standardmodell setzt die Zeit erst mit dem Urknall ein, ihr Nullpunkt liegt im »singulären« Geburtsmoment der Raumzeit. Ein Davor konnte es im Standardszenario so wenig geben wie ein Außerhalb des Universums – schon danach zu fragen war sinnlos. Aber die Urknallsingularität mit unendlich hoher Dichte und Temperatur trug stets den Makel eines unphysikalischen Anfangszustands.

Was Sie schon immer über Sex und den Urknall wissen wollten

Im Lichte moderner und – zugegeben – spekulativer Theorien vom Kosmos dürfen Forscher inzwischen immerhin solche Frage stellen, ohne sich den Zorn ihrer Fachkollegen zuzuziehen. Als wir vor drei Jahren zum ersten Mal über ein »All ohne Urknall« berichteten (SdW 8/2001, S. 12), hielt der Münchner Kosmologe Gerhard Börner solche Überlegungen immerhin für legitim, solange sie nicht als gesicherte wissenschaftliche Erkenntnis angepriesen würden. Was die Angelegenheit unterdessen von purer Spekulation unterscheidet, sind Vorschläge für Beobachtungen, mit denen sich – zumindest prinzipiell – nach Spuren eines Kosmos vor dem unsrigen fahnden ließe (Seite 30).



Seit kurzem ist unser Medizin-Spezial »Moderne Medizin« an den Kiosken. Das Titelthema beschreibt die Aussichten, erblindete Menschen mit einem »Sehchip« wieder sehend zu machen. Daneben geht es um das spannende Gebiet der regenerativen Medizin: Aus körpereigenen Zellen sollen Gewebe und Organe nachgezüchtet oder an Ort und Stelle repariert werden. Wir berichten über die Verwirklichung dieser Vision.

AUGUST 2004

INHALT

SPEKTROGRAMM

10 Teleportation von Atomen · Mit Vollgas gegen Staus · Sprachbegabter Hund · Strom von der Seeschlange u. a.

13 **Bild des Monats**
Urtier im Ei

FORSCHUNG AKTUELL

14 **Rohrpost zwischen Zellen**
Über neu entdeckte Nanoröhren werden substanzgefüllte Bläschen ausgetauscht

16 **Wird R2-D2 bald Wirklichkeit?**
Ein sprechender Haushaltsroboter soll Pflegebedürftige umsorgen

19 **Korallenriffe heizten die Erde auf**
Die heutigen Opfer der Erderwärmung waren einst Täter im Klimageschehen

THEMEN

▶ **24** **Wölfe als Naturschützer**
Ihre Rückkehr in den Yellowstone-Nationalpark tat dem Ökosystem gut

▶ **30** **Kosmologie**
Gab es ein All vor dem Urknall?

▶ **42** **Neue Behandlung für Schockpatienten**
Ein Hormon bietet überraschende Hilfe bei völligem Kreislaufkollaps

48 **Neues vom Ringplaneten**
Erste detaillierte Fotos von den Ringen und Monden des Saturnsystems

▶ **58** **Wofür Sex da ist**
Wissenschaftlich lässt sich das gar nicht so leicht erklären

▶ **62** **Woran starben die Dinosaurier wirklich?**
Noch immer wogt der Streit über das Massensterben am Ende der Kreidezeit

▶ **70** **Emmy Noether**
Die bedeutendste Mathematikerin des 20. Jahrhunderts

▶ **78** **Essay: Gerechtigkeit**
Die Philosophie des John Rawls

▶ **90** **Olympia**
Siegen dank Training und Forschung:
- Sensortechnik verbessert das Training
- Von der Vorstellung zur Bewegung
- Kann Gentechnik das Training ersetzen?
- Sportgeräte vom Feinsten



SEITE 24

NATURSCHUTZ

Wieder Wölfe in Yellowstone

Seit im Yellowstone-Nationalpark in den USA wieder Wölfe leben, regeneriert sich das Ökosystem

SEITE 42

MEDIZIN

Neues Mittel gegen Schock

Zu den gefürchtetsten medizinischen Komplikationen gehört der Schock. Eine Zufallsentdeckung könnte helfen, die Überlebenschancen zu erhöhen

SEITE 48

PLANETENFORSCHUNG

Cassini – Ankunft am Saturn

Während der Orbiter Cassini bereits spektakuläre Bilder vom Ringplaneten sendet, soll in Kürze die Sonde Huygens auf dem größten Saturnmond Titan landen



SEITE 58

EVOLUTION

Die Krux mit dem Sex

Fast jede Spezies praktiziert Sex und möchte ihn auch keinesfalls missen. Dabei gibt es viel effizientere Wege, sich fortzupflanzen. Wofür also ist Sex eigentlich da?

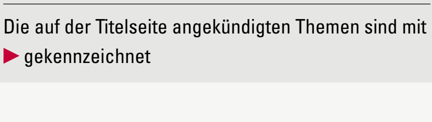
SEITE 62



ERDGESCHICHTE

Endloser Streit um das Ende der Dinosaurier

Verursachte der Einschlag eines Himmelskörpers im Süden Mexikos das Massensterben am Ende der Kreidezeit? Nach jahrzehntelangen Debatten schien sich diese Theorie durchgesetzt zu haben. Doch Skeptiker erheben neue Einwände



Titelbild: Fünf vor zwölf – im klassischen Urknallmodell eine verbotene Angabe. Nach der Stringtheorie jedoch wird aber selbst eine Zeit »vor dem Urknall« vorstellbar.
Bild: Tom Draper Design; Hintergrund: MSX / IPAC / NASA

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet

SEITE 30

TITELTHEMA KOSMOLOGIE

Die Zeit vor dem Urknall

Quantentheorien der Gravitation legen nahe, dass das Universum nicht erst mit dem Urknall begann. Winzige Restspuren dieser kosmischen Vorzeit wären im Prinzip am Himmel nachweisbar

SEITE 70

MATHEMATIKGESCHICHTE

Emmy Noether (1882–1935)

Die »Noether-Theoreme« zählen zum Grundbestand der mathematischen Physik. Ihre geniale Schöpferin hatte sich gegen Hindernisse durchzusetzen, die uns heute völlig antiquiert erscheinen



SEITE 78

PHILOSOPHIE

Essay: Metamorphosen der Gerechtigkeit

Der Moralphilosoph John Rawls widmete sein ganzes Leben dem Problem der Gerechtigkeit

SEITE 90

SPORTWISSENSCHAFT

Olympiade der Forschung

Wenn in Athen die besten Sportler der Welt an den Start gehen, steht auch die Wissenschaft vor einer Bewährungsprobe

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

REZENSIONEN

109 **Die Alpen** von Werner Bätzing
Landschaften zwischen Himmel und Erde von Art Wolfe und Art Davidson
The Pathological Protein von Philip Yam
Die Krankheitserfinder von Jörg Blech

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

101 **Leichtes Spiel mit dem Schwerpunkt**

KOMMENTAR

20 **Wirtschaft forscher als der Staat**
Industrie leistet Löwenanteil an Forschung und Entwicklung in Deutschland

22 **Nachgehakt**
Übergewicht und Elend

WISSENSCHAFT IM ...

40 **Alltag:** Die heimlichen Sieger

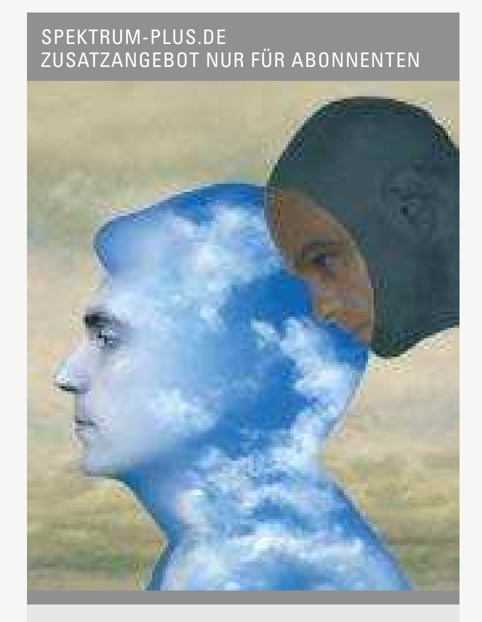
56 **Rückblick:** Mistkäfer-Orientierung im polarisierten Licht u. a.

98 **Unternehmen:** Die Goldschmiede

WEITERE RUBRIKEN

5 Editorial · 8 Leserbriefe/Impressum · 89 Preisrätsel · 114 Vorschau

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN



Gedankenleser

Erkennen, was im Kopf eines anderen vorgeht – Wissenschaftler tüfteln an Maschinen, die Gedanken lesen sollen

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

Mars im Fokus

Mai 2004

Dass es auf dem Mars einmal größere Mengen Wasser gegeben hat, bezweifle ich zwar nicht, jedoch erlaubt die Anwesenheit makroskopischer Mengen von Nanopartikeln (Staub) in Verbindung mit wasserlöslichen Salzen und dem spurenhaften Auftreten von Wasser noch eine alternative Erklärung zur Bildung dieser Objekte.

Beispielsweise ist bei Aerosil (mikronisiertes Siliziumdioxid, Korngröße zirka 10 bis 15 nm) folgendes Phänomen beobachtbar: Wenn diese pulverförmige Substanz mechanischer Beanspruchung (zum Beispiel durch leichtes Schütteln) ausgesetzt wird, bilden sich durch elektrostatische Kräfte und Kohäsion lockere Zusammenballungen von bis zu 5 mm Durchmesser. Wie ich in einem einfachen Experiment beobachten konnte, lassen sich diese durch Zugabe von Partikeln anderer Zusammensetzung und Korngröße so modifizieren, dass diese kleiner, dichter und fester werden. Außerdem verändert sich die Geometrie der Agglomerate immer mehr in Richtung Kugel (sie rollen dann sogar richtig im Gefäß).

Es wäre also denkbar, dass die Mars-Sphärulen einen ähnlich trockenen Entstehungsprozess durchlaufen haben, wobei das »Schütteln« durch andere mechanische Einwirkungen auf den Staub, zum Beispiel von Sandstürmen, übernommen wurde.

Mirko Eretel, Berlin

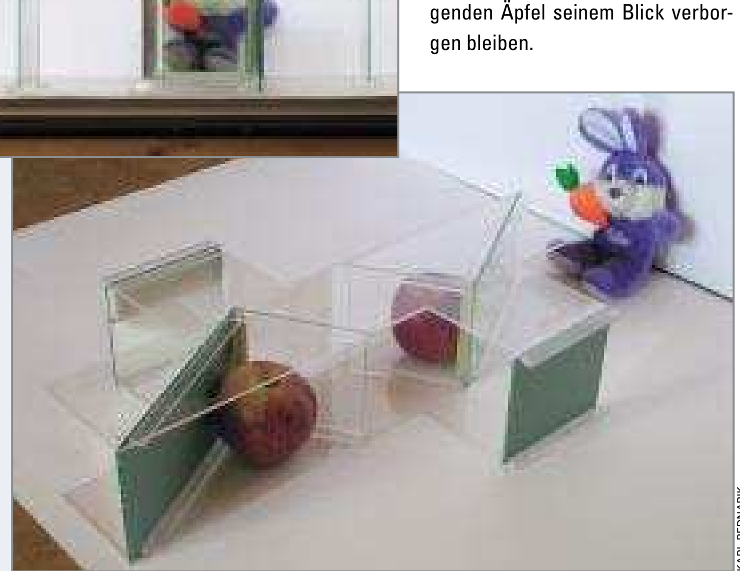
Spiele mit ebenen Spiegeln

Physikalische Unterhaltungen, Juni 2004

Eine interessante Variante der Amici-Spiegel ist die unten stehende Anordnung aus vier Spiegeln. Das Gerät selbst ist nahezu unsichtbar, denn man sieht die beiden seitlichen Spiegel und die Boden- und Deckplatte nur von der Kante. Deshalb kann man neben dem umgeleiteten Bild des Hintergrunds an allen Seiten den echten Hintergrund auf direktem Wege sehen.

Es geht auch mit drei Spiegeln, wenn zwei von ihnen parabelförmig gekrümmte Zylinderspiegel (nicht Parabolspiegel) sind.

Karl Bednarik, Wien



◀ Der Betrachter hat den vollen Durchblick auf das Karnickel, während die auf dem direkten Weg liegenden Äpfel seinem Blick verborgen bleiben.

KARL BEDNARIK

Die Ursachen der Eifersucht

Juni 2004

Die Ursache für Eifersucht ist schlichtweg Besitz. Sie hat nichts mit Liebe zu tun. Eifersüchtig sind wir, weil wir das Objekt, auf das wir es abgesehen haben, besitzen wollen. Es geht nicht um drohende, verschwendete Vaterschaftsbemühungen bei Männern oder um verlorene emotionale Zuwendung für die Kinderaufzucht bei Frauen.

Dass dennoch eine unterschiedliche Ausprägung bei beiden Geschlechtern stattfindet und beobachtet wird, liegt an Folgendem: Männer müssen besitzen, weil sie sich über Besitz definieren und bestätigt werden.

Wir bewundern Männer, die es zu Ansehen und Reichtum gebracht haben. Frauen hingegen müssen ihre Kinder erziehen und dies geschieht unabhängig von emotionaler Zuwendung. Es reicht, wenn der Mann jagt oder ihr Geld lässt. Das ist nicht gewährleistet, wenn er sich woanders umschaut.

Dies scheint also die evolutionspsychologische Ansicht zu bestätigen, wenn auch aus einem anderen, einfacheren Motiv heraus. Doch es bleibt die Tatsache, dass Eifersucht ein angeborenes Verhalten ist.

Dominique Boursillon, Sigmaringen

Missverständnisse

Essay, Mai 2004

Der Essay ist nicht uninteressant, allerdings im Hinblick auf das Thema viel zu kurz und oberflächlich. An einigen Stellen spielt unausgesprochen die Unterscheidung zwischen Konnotation und Denotation eine Rolle, so im Abschnitt »Vieldeutige Bedeutungen«: »Das Wort DDR zum Beispiel klingt heute anders als vor 1989, obendrein anders für einen SED-Funktionär als für einen Mauerflüchtling, anders für einen Ossi als für einen Wessi.«

Welche Art von Missverständnissen ist hier nun genau gemeint? Es handelt sich in diesem Fall tatsächlich wohl eher um verschiedene Konnotationen, die mit ein und demselben Begriff verbunden werden können – eine ziemlich normale, alltägliche Sache. Der Essay entwickelt keinen befriedigenden Gedankengang.

Dr. Leonardus van de Velde, Tossens

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 104840
D-69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: 06221 9126-729

Night Visions

Rezensionen, April 2004

Der auf Seite 95 groß abgebildete Schmetterling *Habrosyne scripta* gehört nicht zur Familie der Spanner (Geometridae), sondern zur Familie der Eulenspinner (Cymatophoridae).

Gerhard Staguhn, Hamburg

Anmerkung der Redaktion:
Beide Familien gehören zur Oberfamilie der Spannerartigen (Geometroidea). Anstelle von Cymatophoridae ist auch der Familienname Thyatiridae gebräuchlich. Die Systematik der Schmetterlinge wird unter den Fachleuten häufig kontrovers diskutiert.

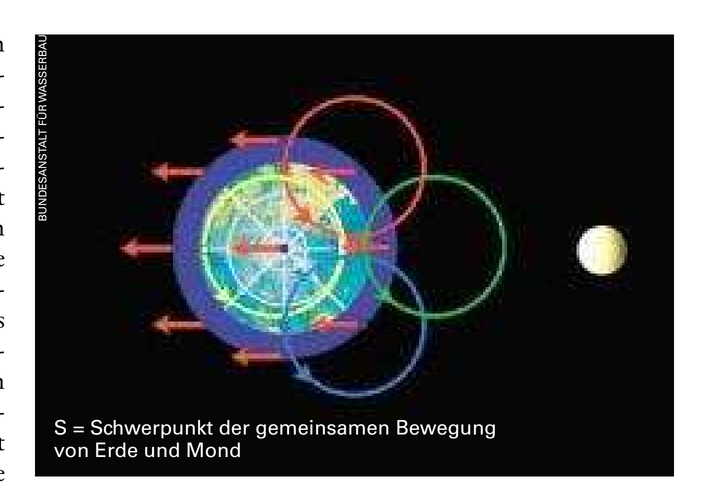
Im Wandel der Gezeiten

Mai 2004

Zu diesem Artikel erhielten wir viele Leserbriefe, die sich mit der dort abgebildeten und vermeintlich falschen Grafik »Wie die Gezeitenberge und -täler entstehen« auseinander setzten. Der Autor Albrecht Sauer gibt dazu folgenden Kommentar:

Wenn komplexe Sachverhalte auf schnellfassliche Erklärungen heruntergebrochen werden, wie es in einer besuchernahen Ausstellung mit kurzen Verweilzeiten vor dem Einzelexponat nötig ist, gehen notgedrungen manche Details verloren beziehungsweise werden Zusammenhänge zur Veranschaulichung besonders pointiert.

So auch die Pfeile der Kräfteparallelogramme in der im Mai-Heft auf S. 58 abgebildeten Grafik: Ihre Richtung und ihre Länge überzeichnen die grundsätzlichen Gegebenheiten der gezeitenerzeugenden Kräfte. Auch ist »Gramm« heute keine korrekte Bezeichnung für Kräfte mehr, dafür aber eine für jedermann vorstellbare Größe. Dennoch: Die Fliehkraftpfeile in der Grafik müssen parallel sein. Diese bei tieferem Eindringen in den verkürzt dargestellten Sachverhalt zunächst schwer nachzuvollziehende Gegebenheit resultiert aus der besonderen Art der als »Revolution ohne Rotation« bezeichneten Erdbewegung: der Drehung des Zwei-Körpersystems Erde-Mond um den gemeinsamen Schwerpunkt und der Drehung der Erde um sich selbst – schließlich wendet die Erde dem Mond nicht stets dieselbe Seite zu. Dabei führen alle Punkte auf der Erdoberfläche eine Kreisbewegung aus, bei der sie gleich großen, parallel wirkenden Fliehkräften ausgesetzt sind. In der hier gezeigten Grafik (oben) ist dies exemplarisch für vier Punkte dargestellt (gelber, blauer, grüner und roter Kreis).



S = Schwerpunkt der gemeinsamen Bewegung von Erde und Mond

▲ Erde und Mond kreisen um einen gemeinsamen Schwerpunkt (S), der innerhalb des Erdkörpers liegt. Die Fliehkraft der gemeinsamen Bewegung (rote Pfeile) wirkt an allen Punkten der Erdoberfläche mit gleicher Kraft parallel zur Verbindungsachse der beiden Himmelskörper.

Die Stärke der Fliehkräfte (und damit die Länge der Pfeile) entspricht exakt der Gravitationskraft des Monds im Schwerpunkt der Erde, ihre Richtung ist entgegengesetzt: Es ist die Kraft, die verhindert, dass Erde und Mond »aufeinander zu fallen«.

Einige Fachwissenschaftler wiesen außerdem in Leserbriefen darauf hin, dass Fliehkräfte nur scheinbare Kräfte seien, die lediglich aus der Sicht des rotierenden Systems bestehen. Die beiden Gezeitenberge bildeten sich aber auf der mondzu- wie der mondabgewandten Seite ebenso aus, wenn Erde und Mond »aufeinander zu fielen«, also kein Gleichgewicht zwischen Flieh- und Gravitationskräften bestünde. Denn in diesem Fall würden durch die Massenträgheit der Erde ihre dem Mond nächsten Teile am stärksten, hingegen die entferntesten am schwächsten beschleunigt und der Erdkörper und seine Meere entsprechend eiförmig verformt. Unter diesem Verständnis lässt sich die auf und in der Erde differenzielle Gravitationskraft des Monds als einzige für die Gezeiten ursächliche Kraft bezeichnen.

Zum tieferen Verständnis ist vielleicht eine ausführlichere Erklärung des Gesamtphänomens hilfreich, die sich im Internet unter der Adresse http://home.t-online.de/home/Kreuer.Dieter/Astro/Tides/Tides.htm befindet.

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Naghib, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. 0211 90833-57, Fax 0211 90833-58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Werner Gans, Dr. Rainer Kayser, Dr. Frank Scholz, Dr. Frank Schubert, Dr. Hans Zekl.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, D-69469 Weinheim, Tel. 06201 6061-50, Fax 06201 6061-94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)

Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 88723-76, Fax 0211 374955
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0711 88723-87, Fax 0211 374955
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 25 vom 01.01.2004.

Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President and International Manager: Dean Sanderson

ENERGIEGEWINNUNG

Den Wellengang geschmeidig nutzen



Die Idee eines Wellenkraftwerks ist nicht neu. Doch bisher gelang es nie, die Gewalt der Wogen dauerhaft zu bändigen. Deshalb haben Ingenieure der norwegischen Firma Hydro nun ein flexibles System entwickelt: die »Wellenwurst«. Während starr im Meer stehende Versuchsanlagen stets irgendwann unter der Wucht der anbrandenden Wellen zerbarsten, treibt die über 120 Meter lange und nur sieben Meter breite Konstruktion locker vertäut im Wasser. So trotzt sie nun schon seit einigen Wochen den Gezeiten vor den schottischen Orkneyinseln. Mit ihren vier durch Scharniere verbundenen Segmenten passt sich »Pelamis« – so der offizielle Name nach dem griechischen Wort für Seeschlange – dem Wellengang geschmeidig an. Beim Schaukeln schwappt eine Hydraulikflüssigkeit in ihrem Inneren hin und her und treibt dabei eine Turbine an, welche die Bewegung in elektrischen Strom umwandelt. Noch erfolgt die Energiegewinnung nicht stabil genug, aber immerhin hält die Seeschlange eisern den widrigen Bedingungen in der stürmischen Nordsee stand. Künftig soll jede Einheit genug Strom für 130 Wohnungen produzieren. Auch marine Kraftwerkfarmen mit bis zu vierzig Generatoren sind in Planung. Billig ist der so erzeugte Strom wegen des anspruchsvollen Verfahrens bisher allerdings nicht. Doch Richard Erskine, Leiter von Hydro Technology Venture, rechnet damit, die Kosten innerhalb von zehn Jahren auf den Preis von Kohle und Erdgas drücken zu können. *(Norsk Hydro)*

ASTRONOMIE

Ein Licht im Zentrum der Katastrophe

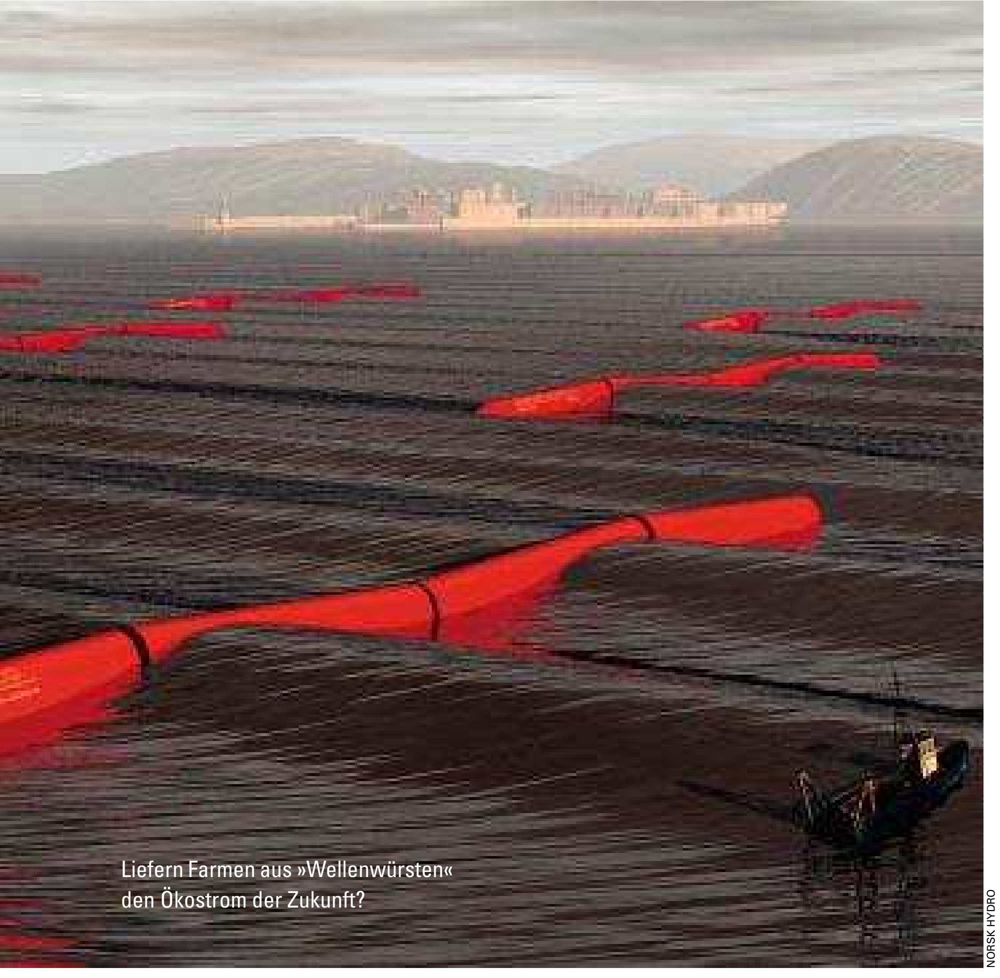
Astronomen von der York University in Toronto haben in der 30 Millionen Lichtjahre entfernten Galaxie NGC 891 den jüngsten strahlenden Überrest einer Supernova entdeckt. Die Sternexplosion selbst wäre 1983 zu beobachten gewesen, aber die Wissenschaftler verpassten das Ereignis und erfuhren erst davon, als schon alles vorbei war: Zufällig erspähten sie 1986 die gewaltige Explosionswolke und nannten sie entsprechend SN1986J. Heute ist der Supernova-Überrest 18 Jahre alt.

In diesem zarten Alter haben die Astronomen ein solches Objekt bisher noch nie zu Gesicht bekommen. Alle anderen bekannten Exemplare existieren mindestens seit einigen hundert Jahren. Doch bei SN1986J ließ sich schon jetzt im Zentrum der Explosionswolke ein Leuchten im Radiobereich ausmachen. Es stammt zweifelsfrei von dem Relikt des kollabierten Sterns: einem Schwarzen Loch oder einem Neutronenstern. Beides sind extrem kompakte Objekte, die umgebende Materie aufsaugen, wobei Strahlung ausgesandt wird. Bis jetzt konnten die Forscher noch nicht zwischen den zwei Möglichkeiten unterscheiden. Sie sind jedoch zuversichtlich, dass ihnen dies bei der weiteren Beobachtung gelingt. In jedem Fall werden sie die Entwicklung ihres Babys in den nächsten Jahren wachsam verfolgen; schließlich ist dies eine einmalige Gelegenheit, mehr über das Schicksal eines massereichen Sterns unmittelbar nach seinem fulminanten Ende zu erfahren. *(Science express, 10.6.2004)*



AUFNAHME: N. BARTEL UND M. F. BIETENHOLZ, YORK UNIVERSITY; KOLORIERUNG: G. ARGUNER

Das im Radiobereich leuchtende Zentrum von Supernova 1986J ist von Material, das der Stern während der Supernova-Explosion weggeschleudert hat (rot), und von einer Staubscheibe (blau) umgeben. Die Farben auf dieser Zeichnung sind willkürlich gewählt.



Liefern Farmen aus »Wellenwürsten« den Ökostrom der Zukunft?

NORSK HYDRO

GENETIK

Hitze macht Alge heiß



AURORA NEDELCU

Volvox-Kolonie mit vegetativ gebildeten Ablegern (dunkelgrün). In der Hitze geht die Kugelalge dagegen auf sexuelle Vermehrung über.

Gegen harte Zeiten hat *Volvox carteri* ein Patentrezept: Sex. Die Kugelalge, die im Süßwasser lebt, vermehrt sich normalerweise ungeschlechtlich. Wird das Wasser jedoch sehr warm, schaltet sie auf sexuelle Fortpflanzung um. Dabei entstehen so genannte Zygoten, die praktisch keinen Stoffwechsel mehr betreiben und mit ihren harten Zellwänden – ähnlich wie Sporen – auch in ausgetrockneten Gewässern überleben können. Aurora Nedelcu von der Universität von Neubraunschweig in Fredericton (Kanada) hat nun den molekularen Auslöser dieses Strategiewandels gefunden: freie Radikale. Das sind Nebenprodukte des Stoffwechsels, die biologisches Gewebe zerstören und die Erbsubstanz DNA schädigen können.

Ihre Menge nimmt zu, wenn sich bei steigender Temperatur der Stoffumsatz der Alge erhöht. Zwar verfügt *Volvox* über Mittel, die freien Radikale abzubauen, bevor sie Schaden anrichten können. Mit zunehmender Wassertemperatur erreicht die Konzentration der aggressiven Molekülfragmente jedoch einen kritischen Wert. Ein spezielles Gen veranlasst dann die Produktion zweier Geschlechtshormone, die den Umstieg auf die sexuelle Vermehrung bewirken. Die Zygoten mit ihrem stillgelegten Stoffwechsel sind nicht mehr durch freie Radikale gefährdet. Zudem wird bei der sexuellen Vermehrung das Genmaterial neu gemischt. Geschädigte Abschnitte können dabei gegen korrekte ausgetauscht werden. *(Proceedings of the Royal Society B, im Druck)*

BIOLOGIE / ETHOLOGIE

Was ein Hund so alles versteht

Rico besitzt eine Stofftiersammlung, um die ihn jedes Kind beneiden dürfte. Was aber noch erstaunlicher ist: Er kennt jedes seiner über 200 Plüschtiere mit Namen. Damit beeindruckte er schon 1999 ein Millionenpublikum bei »Wetten, dass ...?«. Wie Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig nun herausfanden, reichen seine geistigen Fähigkeiten aber noch weiter. So kann der neunjährige Bordercollie im Ausschlussverfahren neue Begriffe lernen.

Das demonstrierten die Forscher mit einem einfachen Versuch: Sie legten unbemerkt ein neues Stofftier in Ricos Sammlung und forderten ihn auf, es zu apportieren, indem sie es beim Namen nannten. Der Rüde hatte das betreffende Wort zwar noch nie gehört, brachte aber trotzdem das richtige Objekt. Offenbar begriff er, dass mit dem unbekannten Ausdruck das fremde Plüschtier gemeint sein musste.

Eine solch abstrakte Denkleistung traute man bisher nur Menschen zu. Insgesamt kann Rico mit dem Sprachverständnis eines Dreijährigen mithalten. Ist er also ein Wunderhund oder repräsentativ für seine Artgenossen? Juliane Kaminski, die mit ihm arbeitete, glaubt Letzteres. Ihrer Ansicht nach haben Hunde sich seit ihrer Domestizierung vor rund 15 000 Jahren der menschlichen Kommunikation angepasst. *(Science, 11.6.2004, S.1682)*

Kluger Hund! Rico zeigt das Sprachverständnis eines dreijährigen Kindes.



BAUS / KRZESLOWSKI

KLIMAFORSCHUNG

Blick ins Tiefkühlfach der Erde

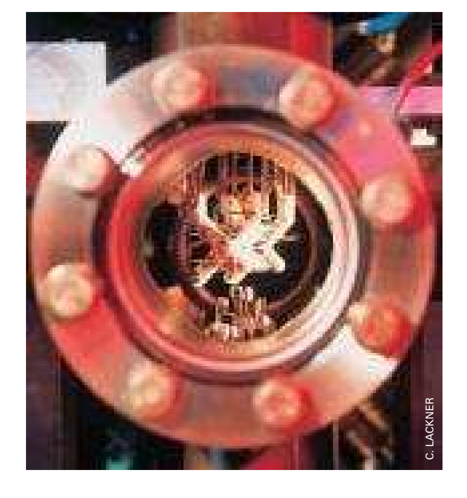
Einen Rekord vermelden Klimaforscher aus der Antarktis: Sie konnten mehr als drei Kilometer tief ins ewige Eis am Südpol bohren. In den gewonnenen zylindrischen Eisblöcken sind lückenlos alle Schneefälle der letzen 740 000 Jahre eingeschlossen. Damit drangen die Teilnehmer des »Europäischen Projekts für Eisbohrungen in der Antarktis« fast doppelt so weit in die irdische Klimahistorie vor wie ihre russischen Kollegen vor einem Jahrzehnt an der Station Vostok. Hatte deren Bohrkern vier Eiszeiten überspannt, so sind es jetzt acht. Das ergibt sich aus der per Isotopen-Analyse rekonstruierten Temperaturkurve. Allerdings waren die Klimaextreme in den ältesten Zyklen nicht ganz so groß wie in den jüngeren.

Besonders interessant sind die Ergebnisse für die Warmzeit vor 425 000 bis 395 000 Jahren; denn damals stimmten die Parameter der Erdbahn, von denen das irdische Klima abhängt, ziemlich genau mit den heutigen überein – was seither nie wieder der Fall war. Diese Warmzeit kann somit als historisches Modell für die heutige Situation dienen. Tatsächlich deckt sich der Kohlendioxidgehalt der seinerzeit im Eis eingeschlossenen Luftbläschen mit dem vor dem Beginn der industriellen Revolution. Sollte die heutige Warmzeit genauso lang verlaufen wie damals, hätten wir noch gut 15 000 Jahre bis zum nächsten Absturz in den Eiskeller. Allerdings hat der massive Ausstoß von Kohlendioxid durch den Menschen unser Klimasystem vermutlich längst aus den natürlichen Geleisen geworfen. *(Nature, 10. 6. 2004, S. 623)*



Abschnitt des 2,5 Kilometer langen Eisbohrkerns vor dem Camp auf »Dome C« im Osten der Antarktis, wo die Bohrung stattfand

S. KIPFSTUHL, AWI



C. LACKNER

In dieser Ionenfalle gelang erstmals die Teleportation von Kalzium-Atomen.

QUANTENPHYSIK

Teleportation mit ganzen Atomen

Captain Kirk und Mr. Spock nannten es Beamen. Mit dieser Technik schafften sie es, sich von einem Ort an einen anderen versetzen zu lassen, ohne die dazwischen liegende Strecke zurücklegen zu müssen. Physiker sprechen von Teleportation und stellen auch etwas geringere Ansprüche. Sie wollen nicht einen kompletten Gegenstand, sondern nur die komplette Information darüber an einen anderen Ort übertragen. Mit Lichtquanten ist ihnen das schon 1997 gelungen. Jetzt konnten zwei Physikerteams unabhängig voneinander erstmals auch den Quantenzustand eines Atoms teleportieren.

Grundlage der Versuche bildete – wie bei den Photonen – die so genannte Verschränkung, die bei materiellen Teilchen jedoch viel schwerer zu erreichen ist. Zwei Atome wurden bei extrem tiefen Temperaturen in einer Ionenfalle in der Schwebe gehalten und in einen gemeinsamen Quantenzustand versetzt. Dieser ist stets messbar, während der Einzelzustand unbekannt bleibt.

Forscher der Universität Innsbruck verschränkten nun eines der beiden Atome zusätzlich mit einem dritten, dessen Zustand sie dann mit Hilfe von Laserpulsen mit einer Erfolgsrate von 75 Prozent über eine Entfernung von wenigen Mikrometern teleportieren konnten. Sie arbeiteten dabei mit Kalzium, das Team vom National Institute of Standards and Technology (NIST) in Boulder (Colorado) dagegen mit Beryllium. Die Teleportation von Zuständen ganzer Atome ließe sich für Quantencomputer nutzen, wenn es gelänge, sie mit sehr viel einfacheren und kleineren Apparaturen zu erreichen. *(Nature, 17. Juni 2004, S. 734/737)*

VERKEHRSSIMULATION

Mit Vollgas aus dem Stau

Notorische Raser werden es gerne hören: Aggressives Fahren kann Staus vermeiden helfen. So das Ergebnis einer Computersimulation am Beispiel Bogotás. Schon lange rätselten Luis E. Olmos und José D. Muños von der Nationaluniversität Kolumbiens, warum es in der Metropole mit ihren sieben Millionen Einwohnern, von denen immerhin jeder siebte ein Auto hat, kaum Staus gibt. Auf der Suche nach der Antwort fuhren die Forscher bei zufällig ausgewählten Personen mit und notierten durchschnittliche Geschwindigkeit, Bremshäufigkeit und Beschleunigung. Aus diesen Daten konstruierten sie Verhaltensregeln für virtuelle Fahrer in einem zellulären Automaten. So konnten sie die Merkmale des Straßenverkehrs in Bogotá reproduzieren und den Grund für den meist reibungslosen Fluss ermitteln.

Verblüffendes Ergebnis: Es liegt an dem besonders rasanten Fahrstil der Kolumbianer. Allerdings nicht allein: Eine Verbesserung der öffentlichen Verkehrsmittel und der Infrastruktur für Radfahrer sowie Restriktionen für die Benutzung von Privatwagen sorgten zugleich für eine Entlastung der Straßen. Außerdem hat auch in Kolumbien die Raserei ihren Preis: Jeder sechste Einwohner, der keines natürlichen Todes stirbt, fällt einem Verkehrsunfall zum Opfer. *(International Journal of Modern Physics C, Juni 2004)*

Mitarbeit: Dagny Lüdemann

Urtier im Ei

Fossile Dinosaurier-Eier gibt es relativ viele, aber nur in wenigen wurde auch ein Embryo entdeckt. Und der ist meist so schlecht erhalten, dass selbst eine grobe stammesgeschichtliche Zuordnung schwer fällt. Um so faszinierender ist der jüngste Fund zweier chinesischer Forscher: die Versteinerung eines flach gedrückten Eis (oben links) mit so gut konserviertem Embryoskelett, dass sich nicht nur die Familienzugehörigkeit bestimmen, sondern auch rekonstruieren ließ, welche Körperhaltung das kurz vor dem Schlüpfen stehende Tier einnahm (Zeichnung). Das Fossil stammt aus kreidezeitlichen Schichten in der Provinz Liaoning im Nordosten Chinas. Es hat etwa die Größe eines Hühnereis und wurde auf ein Alter von 121 Millionen Jahren datiert. Es ist der erste fossil erhaltene Embryo eines Flugsauriers überhaupt. Die genaue Analyse der Knochen ergab, dass das Tier zur Familie der Ornithocheiriden in der Unterordnung der Pterodactyloiden gehörte. Zudem sind Teile der Flugmembran und Hautabdrücke erhalten. Die Flügelspannweite beträgt 27 Zentimeter. Der Embryo im Ei hat nur deshalb die Jahrmillionen überdauert, weil er bei einer Naturkatastrophe – vermutlich einem Vulkanausbruch – getötet und sofort unter Gesteinsschutt begraben wurde.

BIOLOGIE

Rohrpost zwischen Zellen

Forscher an der Universität Heidelberg haben tunnelartige Verbindungen zwischen Säugerzellen entdeckt. Durch die mikrometerlangen Nanoröhren werden selektiv und nur in eine Richtung substanzgefüllte Membranbläschen geschleust. Der Zweck ist noch unklar.

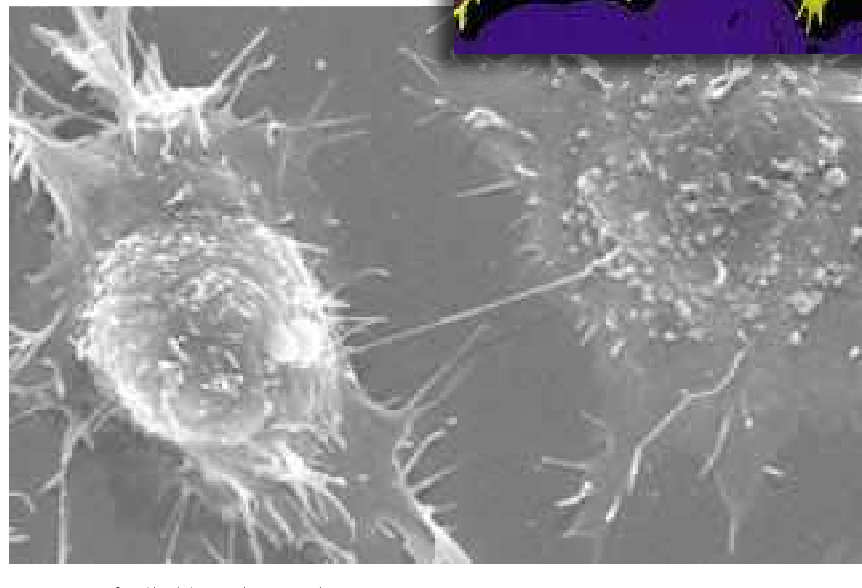
Von Georg Sposny

Am Anfang stand eine Nachlässigkeit. Amin Rustom, Doktorand bei Hans-Hermann Gerdes am Institut für Neurowissenschaften der Universität Heidelberg, sollte Tumorzellen der Rattenniere untersuchen, die er in einer Petrischale gezüchtet hatte. Üblicherweise zog er dafür vorher das Nährmedium ab und färbte dann die Plasmamembran ein. Doch diesmal verzichtet der Jungforscher auf den ersten Schritt und gibt gleich den Farbstoff zu. Prompt erlebt er im Mikroskop eine Überraschung: Wie feine Fäden spannen sich zwischen den Zellen hauchdünne, geheimnisvoll schimmernde Membranröhren. Beim Abziehen des Mediums hatte er sie zuvor stets unwissentlich zerstört.

Obwohl Rustom und sein Doktorvater keine Experten für extrazelluläre Zellstrukturen sind, sondern sich auf Signalvorgänge innerhalb von Nervenzellen spezialisiert haben, erkennen sie das Besondere ihrer Entdeckung. Zunächst suchen sie in anderen Zellkulturen in ihrem Labor – normalen Zellen der Rattenniere und menschlichen embryonalen Nierenzellen – nach den Nanoröhren und werden fündig. Offenbar tritt das Phänomen also verbreitet auf und ist keine einmalige Zufallserscheinung.

Messungen ergeben, dass die Fäden 50 bis 200 Nanometer dick sind und sich über eine Länge von mehreren Zelldurchmessern – also bis zu einige Dutzend Mikrometer weit – erstrecken können. Nun wird es auch Zeit, über einen Namen nachzudenken. Die Forscher erlauben sich einen kleinen Scherz und wählen TNT, bekannt als Kurzbezeichnung für den Sprengstoff Trinitrotoluol; in diesem Fall aber steht es für »tunneling nanotube« (tunnelartige Nanoröhre).

Die weitere Erforschung des Phänomens droht zunächst an einem profanen Problem zu scheitern, das mit der extremen Empfindlichkeit der Strukturen zusammenhängt. Das Mikroskop für die Untersuchungen steht in einem verzweigten System unterirdischer Gänge, das die Institute im Theoretikum der Universität Heidelberg miteinander verbindet. Im Tunnel vor dem Untersuchungsraum aber rumpelt regelmäßig ein Müllwagen-Konvoi vorbei. Die Erschütterungen lassen die TNTs vor den Augen von Rustom ins Nirwana entschwinden. Aber schließlich gelingt es, die Bürokraten davon zu überzeugen, die Müllwagen umzuleiten und den Tunnel zur verkehrsberuhigten Zone zu erklären.



BEIDE BILDER: A. RUSTOM UND H. GERDES

Zwischen Nierenzellen bilden sich beim Kultivieren in der Petrischale lange, straff gespannte Membranröhren, die im Rasterelektronenmikroskop deutlich erkennbar sind (unten). Sie dienen offenbar dazu, substanzgefüllte Membranbläschen zu übertragen. Das geschieht jedoch nur in einer Richtung (oben).

Mit Membranschläuchen auf Kontaktsuche

Nun ist es endlich möglich, die Bildung der TNTs ohne Störung zu verfolgen und sie dabei zu filmen. Die Videos zeigen, wie in der Zellmembran der Kontakt suchenden Zelle zunächst an einer oder mehreren Stellen kleine Knubbel aussprossen. Sie wachsen zu Membranschläuchen heran – bis die Zelle aussieht wie der Kopf einer Zahnbürste mit langen Borsten. Sobald ein Schlauch den Kontakt mit einer Nachbarzelle aufgenommen hat, bilden sich die anderen zurück. Zugleich wird die entstandene Nanoröhre, die zunächst wie ein lockerer Faden durchhängt, straff gespannt.

Was die Kontaktsuche auslöst, ob sie gerichtet verläuft und warum nur eine Verbindung bestehen bleibt, ist noch ungeklärt. Doch so viel steht fest: Sobald der Kontakt hergestellt ist, verschmelzen die Membranen des Schlauchs und der Empfängerzelle miteinander. Damit haben nun beide Zellen eine gemeinsame, zusammenhängende Hülle – mit der Nanoröhre als verbindendem Tunnel.

Die Entdeckung einer solchen Membrankontinuität zwischen Zellen von erwachsenen Wirbeltieren kann als Sensation gelten. Zwar kennt man schon lan-

ge diverse Kontaktstellen, an denen eine elektrische oder durch spezielle Botenstoffe vermittelte Kommunikation stattfindet; und manchmal werden sogar kleine Moleküle ausgetauscht. Stets aber bleiben die beteiligten Zellen physisch getrennte, von einer eigenen Plasmamembran umschlossene Einheiten.

Nur im Pflanzenreich gilt das nicht. Über Plasmodesmata, kleine Poren, sind hier benachbarte Zellen und deren Cytoplasma (»Zellsaft«) miteinander verbunden. Gleichwohl bestehen grundlegende Unterschiede zu den jetzt entdeckten TNTs. Beispielsweise sind diese, wie sich inzwischen gezeigt hat, keine reinen Membranen, sondern umschließen ein Aktinfilament, das mit ihnen wächst. Aktin ist ein weit verbreiteter Eiweißstoff mit vielen Aufgaben. Insbesondere erzeugt es in Verbindung mit dem Motorprotein Myosin die Muskelbewegung.

Schleuse für Transportbehälter im Zell-Zell-Verkehr

Ein weiterer Unterschied zwischen TNTs und Plasmodesmata: Selbst in ausgeklügelten Versuchen ist es nicht gelungen, einen Fluss von Cytoplasma, Molekülen oder Ionen durch die Nanoröhren hindurch nachzuweisen. Nur bei Proteinen, die in die Plasmamembran selbst eingebettet sind und sich darin frei bewegen, ließ sich durch Kopplung mit Farbstoffen zeigen, dass sie über den Tunnel hinweg von der einen Zelle zur anderen wandern können. Dieser Nachweis, der die Membrankontinuität zweifelsfrei dokumentiert, war freilich mühsam: Er kostete Rustom und Gerdes zusammen mit Rainer Saffrich, einem Experten für Mikroinjektion in Heidelberg, der tagsüber einem anderen Projekt verpflichtet war, mehr als hundert nächtliche Stunden.

Wozu aber dient der Tunnel? Wie sich zeigte, ist er eine exklusive Einbahnstraße für spezielle, membranumhüllte Körperchen: die Endosomen. Mit ihrem Durchmesser von etwa fünfzig Nanometern passen diese Organellen gerade eben durch die dünne Röhre. Üblicherweise fungieren sie als Transportbehälter für diverses Material – Signalmoleküle etwa, oder kleine bis mittelgroße Proteinkomplexe. In der Nanoröhre werden sie von der den Fühler ausstreckenden zu der von ihm kontaktierten Zelle geschleust *(Science, Bd. 303, S. 1007)*.

Zum Bewegungsmechanismus haben Gerdes und Rustom zwei Theorien aufgestellt. Nach der einen könnten die Endosomen mit Hilfe eines Motors ähnlich dem Myosin der Muskelzellen aus eigener Kraft durch die Röhre schwimmen. Dafür bräuchten sie jedoch den Treibstoff Adenosintriphosphat (ATP), bei dessen Spaltung und Umwandlung in Adenosindiphosphat (ADP) Energie frei wird. Es ist im Cytoplasma frei verfügbar, im engen TNT aber, wenn überhaupt, sicher nur in geringen Mengen vorhanden. Das Endosom müsste also selbst genügend ATP mitführen – was unwahrscheinlich erscheint.

Deshalb favorisieren die beiden Forscher ein anderes Modell. Dabei heftet sich das Endosom am Eingang zum Tunnel an die Aktinfaser und lässt sich von ihr wie von einem Förderband durch die Röhre ziehen. Das setzt voraus, dass sich der Aktinfaden selbst bewegt, wobei er auf der einen Seite – in der Kontakt suchenden Zelle – stetig verlängert und auf der anderen abgebaut wird. Das ist nicht unwahrscheinlich; schließlich weiß man, dass Faserproteine oft in einer Art Fließgleichgewicht vorliegen – wobei am einen Ende Auf- und am anderen Abbauprozesse stattfinden.

Dazu passt auch, dass die Organellen in recht gemächlichem Tempo wandern. Sie bringen es nur auf 25 Nanometer pro Sekunde, sodass sie für das Durchqueren des Tunnels bis zu mehrere Minuten brauchen. Folglich dürften die TNTs nicht zur raschen Signalübermittlung dienen, sondern eher eine Rolle bei der mittel- bis langfristigen Koordination der beteiligten Zellen spielen. Über ihren genauen Zweck aber lässt sich einstweilen nur spekulieren.

Ohnehin ist noch keineswegs sicher, dass sie überhaupt im lebenden Organismus vorkommen. Bisher wurden sie nämlich nur in Zellkulturen beobachtet. Eines der nächsten Ziele ist also ihr Nachweis im Körper. In welchen Organen kommen sie vor? Verbinden sie nur Zellen gleichen Typs oder auch unterschiedliche Gewebe? Denkbar wäre, dass die Nanoröhren ein den gesamten Körper überspannendes Netzwerk bilden, das Biologen und Mediziner bisher schlicht übersehen haben. In diesem Fall hätte die kleine Nachlässigkeit eines Doktoranden eine Revolution im Verständnis des Wirbeltierorganismus ausgelöst. ◁

Georg Sposny studiert an der Universität Heidelberg Biologie und arbeitet nebenher als freier Journalist.

ROBOTIK

Wird R2-D2 bald Wirklichkeit?

Ein sprechender Haushaltsroboter des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung soll vor allem in der Altenpflege eingesetzt werden. Bislang noch im Prototyp-Stadium, leistet er doch schon Erstaunliches.

Von Frank Schubert

Sprechende, intelligente Roboter geistern seit Jahrzehnten durch futuristische Romane, Filme und Comics – sei es als Freund des Menschen wie die muntere Blechbüchse R2-D2 in »Star Wars« oder als dessen unerbittlicher Feind wie die Killermaschine im ersten »Terminator«-Film. Mit der Gegenwart haben diese Kunstwesen noch wenig zu tun. Doch langsam beginnt die Realität die Fantasie einzuholen. So könnte die sprechende Roboter-Putzhilfe schon bald im heimischen Wohnzimmer Staub wischen.

Und wenn es so weit ist, dürfen deutsche Forscher sich rühmen, maßgeblich zum Erfolg beigetragen zu haben. Tatsächlich bildet ihr jüngstes Produkt einen Meilenstein auf dem Weg zur vollelektronischen Perle: ein menschenähnlich gestalteter Haushaltsroboter mit flachem Kopf, runden Kamera-Augen und breit geöffnetem Mund, der auf den Namen Care-O-bot II hört. Am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart gebaut, hatte er kürzlich Gelegenheit vorführen, was er alles kann.

»Darf ich Ihnen einen Saft anbieten?«, fragt der maschinelle Butler formvollendet einen staunenden Journalisten. Ein metallener Greifarm fährt vor, mit einem Glas Orangensaft in der zangenähnlichen Hand. Als der Mann zugreift, lockert Care-O-bot II seinen Griff und gibt das Glas frei. Geduldig wartet der Roboter, bis der Journalist getrunken hat. Dann meldet sich die tonlose Stimme wieder: »Bitte geben Sie mir das Glas.« Care-O-bot II lässt es sich reichen, dreht sich um und rollt zum Esstisch. Als ihm ein Wissenschaftler in den Weg tritt, bleibt er sofort stehen und wartet, bis er weiterfahren kann. Dann erst stellt er das Glas auf dem Tisch ab.

»Bitte hole mir einen Apfelsaft aus der Küche!«, verlangt eine ältere Dame, die auf dem Sofa Platz genommen hat. Care-O-bot II fährt los und findet dank einem Laserscanner, mit dem er seine Umgebung abtastet, den Weg zum Kühlschrank. Dort angekommen, öffnet er vorsichtig die Tür und schließt sie wieder, nachdem er das Getränk herausgeholt hat. Dann angelt er ein Glas aus dem Küchenschrank, bringt es zusammen mit dem Saft ins Wohnzimmer und stellt beides auf dem Couchtisch ab.

Der elektronische Butler im intelligenten Haus

Care-O-bot II wurde vor anderthalb Jahren konstruiert und hat schon viele Tests hinter sich. Jetzt haben ihn die Fraunhofer-Forscher in ein elektronisch vernetztes Wohnhaus integriert: das so genannte intelligente Haus (»inHaus«) in Duisburg, ebenfalls eine deutsche Innovation. Ein Konsortium unter Führung des Fraunhofer-Instituts für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme (IMS) hat es zu dem Zweck entwickelt, neue Technologien rund ums Wohnen zu testen. Das Hauptaugenmerk liegt auf der elektronischen Vernetzung: Kühlschrank, Waschmaschine, Heizung, Alarmanlage, Badewanne und das Multimedia-Auto der Bewohner kommunizieren miteinander und tauschen Daten aus. Dadurch

Der bewusst menschenähnlich gestaltete Care-O-bot II kann mit seinem einen Arm ein volles Saftglas reichen oder entgegennehmen, ohne es zu zerbrechen oder etwas zu verschütten.



IPA



lassen sich alle Funktionen Tag und Nacht überwachen und steuern.

»Das Haus stellt zum Beispiel fest, wann Sie da sind, und regelt Licht und Heizung entsprechend«, erklärt Klaus Scherer vom IMS. Tritt ein Defekt in der Heizanlage auf, benachrichtigt diese außer den Bewohnern auch den Handwerker. Der kann per Internet abfragen, wo der Schaden liegt, und gleich das passende Werkzeug mitbringen. Ein anderes Beispiel: Ein verfrühter Besucher steht vor der Tür, bevor man selbst zu Hause ist. Der Heimcomputer schickt dann eine Nachricht aufs Handy. Mittels Haustürkamera kann man den Gast auf dem Handy-Display sehen und ihn gegebenenfalls schon einlassen. Oder man fragt auf dem Heimweg vom Auto aus ab, welche Lebensmittel noch im Kühlschrank sind – und startet bei gähnender Leere gleich zum Supermarkt durch.

In dieser vernetzten Umgebung lassen sich die Fähigkeiten von Care-O-bot II beträchtlich erweitern. Indem der Roboter mit den Haushaltsgeräten kommuniziert, kann er zum Beispiel jederzeit abfragen, welche Medikamente, Getränke oder Speisen vorrätig sind und wo sie gelagert werden. Die entsprechenden Produktpackungen werden dazu mit elektronischen Etiketten versehen, sodass Kühl- oder Arzneischrank im Stande sind, ihren Inhalt selbsttätig zu erfassen. Diese Information können sie wiederum an den Roboter weiterleiten.

Demonstration gefällig? »Bring mir eine Cola!«, bittet der Projektleiter. Die elektronische Haushaltshilfe funkt den Kühlschrank an, und der gibt die Information zurück: keine Cola da. »Cola nicht vorhanden«, erklärt Care-O-bot II, »darf ich ein anderes Getränk bringen?«

Entlastung bei der Altenpflege

Wo liegt der Nutzen solcher Haushaltsroboter? Birgit Graf vom IPA, die maßgeblich an der Entwicklung von Care-O-bot II beteiligt war, sieht Anwendungen vor allem in der Altenpflege: »In einigen Jahrzehnten wird es doppelt so viele Pflegebedürftige geben wie heute. Sie wollen und können nicht alle ins Altersheim.« Roboter sollen künftig einfache Aufgaben im Haushalt übernehmen, ihren Schützlingen als Gehhilfe dienen und überdies mobile Kommunikationsstation sein – Care-O-bot II lässt sich zum Beispiel mit einem abnehmbaren Berührungsbildschirm steuern, der künftig ▷

▷



▷ auch als Telefon und Internet-Anbindung dienen soll.

Allerdings weckt die Vorstellung, dass Roboter hinfälligen Menschen zur Hand gehen, nicht bei allen Begeisterung. Schnell ist von Entwürdigung die Rede. Natürlich solle die Maschine den Pfleger nicht ersetzen, sondern nur entlasten, betonen die Fraunhofer-Forscher. Auch sie geben freilich zu, dass noch viele ethische Fragen zu klären sind. Bislang gibt es nur spärliche Erfahrungen zur Akzeptanz des Roboters bei Pflegebedürftigen.

Ohnehin ist Care-O-bot II nur ein experimenteller Prototyp; bis zur Serienreife werden noch Jahre vergehen. Die bisherigen Entwicklungskosten belaufen sich auf geschätzte 2 Millionen Euro, der angepeilte Stückpreis in der Serienproduktion soll bei 20 000 Euro liegen. Ob sich damit das Ziel verwirklichen lässt, die ausufernden Personalkosten im Pflegebereich einzudämmen, wird die Zukunft zeigen. Jedenfalls ist der sprechende Haushaltsroboter kein Hirngespinst mehr – in absehbarer Zeit könnte er zum Inventar vieler Wohnungen zählen. ◁

Frank Schubert ist promovierter Biophysiker und Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

KLIMA

Riffe heizten die Erde auf

Die Korallen der tropischen Meeresregionen trugen über Jahrtausende hinweg zur Anreicherung des Treibhausgases Kohlendioxid in der Atmosphäre bei.

Von Adam Vecsei

Häufige ungewöhnliche Wetterlagen in Mitteleuropa – extreme Hitze und Dürre im vergangenen Sommer, gewaltige Überflutungen im Jahr davor – sind möglicherweise Vorboten eines drastischen Klimawandels. Die Hauptschuld daran trägt der Mensch, der mit dem massiven Ausstoß von Kohlendioxid den Treibhauseffekt der Atmosphäre erheblich verstärkt.

Allerdings hat der Kohlendioxidgehalt der Lufthülle in der Vergangenheit schon wiederholt auch auf natürliche Weise stark geschwankt. So ist er vom Höhepunkt der letzten Eiszeit vor knapp 20 000 Jahren bis zum Beginn der Industrialisierung Mitte des 18. Jahrhunderts von etwa 180 auf rund 280 millionstel Teile oder ppm (parts per million) angestiegen. Dies belegen Gasbläschen in Bohrkernen aus dem mächtigen Eis der Polargebiete, in denen Proben der einstigen Luft konserviert sind.

Viele Forscher sehen in diesem zusätzlichen Kohlendioxid den Hauptverursacher der Temperaturerhöhung seit dem Ende der letzten Eiszeit. Den Anstoß zur Erwärmung gab zwar vermutlich eine geringe Änderung der Menge und Verteilung der Sonneneinstrahlung auf der Erdoberfläche, die mit Schwankungen der Erdbahn zusammenhängt. Dieser Effekt selbst ist aber viel zu gering, um den Temperaturanstieg seit der Eiszeit zu erklären. Kohlendioxid dürfte als entscheidender Verstärker gewirkt haben.

Opfer und Täter zugleich

Aber woher kam es? Die Hauptquelle wird in den Ozeanen vermutet. Diese speichern etwa 50-mal so viel Kohlenstoff, wie heute in der Atmosphäre vorhanden ist. Daher lässt schon eine geringe Abgabe von Kohlendioxid aus den Meeren die Konzentration des Treibhausgases in der Luft stark zunehmen.

Daniel M. Sigman von der Universität Princeton (New Jersey) und Edward A. Boyle vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge schätzten im Jahr 2000 ab, welchen Einfluss die Ozeane auf den Anstieg des Kohlendioxidgehaltes der Atmosphäre seit dem Höhepunkt der letzten Vereisung hatten. Dabei berücksichtigten sie Faktoren wie die Abnahme der Löslichkeit des Gases im Wasser mit steigender Temperatur. Ihren Berechnungen zufolge ließen die Veränderungen in den Ozeanen die Kohlendioxidkonzentration in der Luft um bis zu 95 ppm steigen. Doch gleichzeitig verbrauchte der Aufbau der Wälder ungefähr 45 ppm, sodass netto nur 50 ppm übrig blieben. ▷

▷ Damit klafft zu dem gemessenen Anstieg von rund 100 ppm eine Lücke von 50 ppm. Bisher war unklar, welcher Prozess dieses fehlende Kohlendioxid beigesteuert haben könnte. Doch nun glauben Wolfgang H. Berger von der Scripps Institution of Oceanography der Universität von Kalifornien in San Diego und ich die Quelle gefunden zu haben: Nach unseren Untersuchungen und Berechnungen handelt es sich überraschenderweise um die Korallenriffe.

Dies birgt eine gewisse Ironie. Als prachtvollstes und artenreichstes marines Ökosystem sind die Riffe durch die momentane Aufheizung der Erde nämlich akut bedroht. Immer mehr dieser einzigartigen Lebensräume bleichen aus und gehen zu Grunde – vermutlich, weil die Korallentiere die hohen Wassertemperaturen nicht vertragen. Während die Riffe heute also primär Leidtragende der globalen Erwärmung sind, waren sie in der Vergangenheit bedeutende Mittäter.

KOMMENTAR

Wirtschaft forscher als der Staat

Den Hauptteil an Forschung und Entwicklung in Deutschland leistet die Industrie.

Das Ziel ist hoch gesteckt: »Wir wollen bis zum Jahr 2010 einen Anteil der Ausgaben für Forschung und Entwicklung von drei Prozent am Bruttoinlandsprodukt erreichen«, verkündete Bundesforschungsministerin Edelgard Bulmahn bei der Vorstellung des Bundesforschungsberichts Anfang Mai dieses Jahres. Immerhin seien die Mittel seit 1998 schon um eine Milliarde auf nunmehr 9,2 Milliarden Euro gestiegen. Über die vergangenen fünf Jahre erhöhte der Bund seine Forschungsausgaben damit um insgesamt 12,4 Prozent. Eine stolze Leistung.

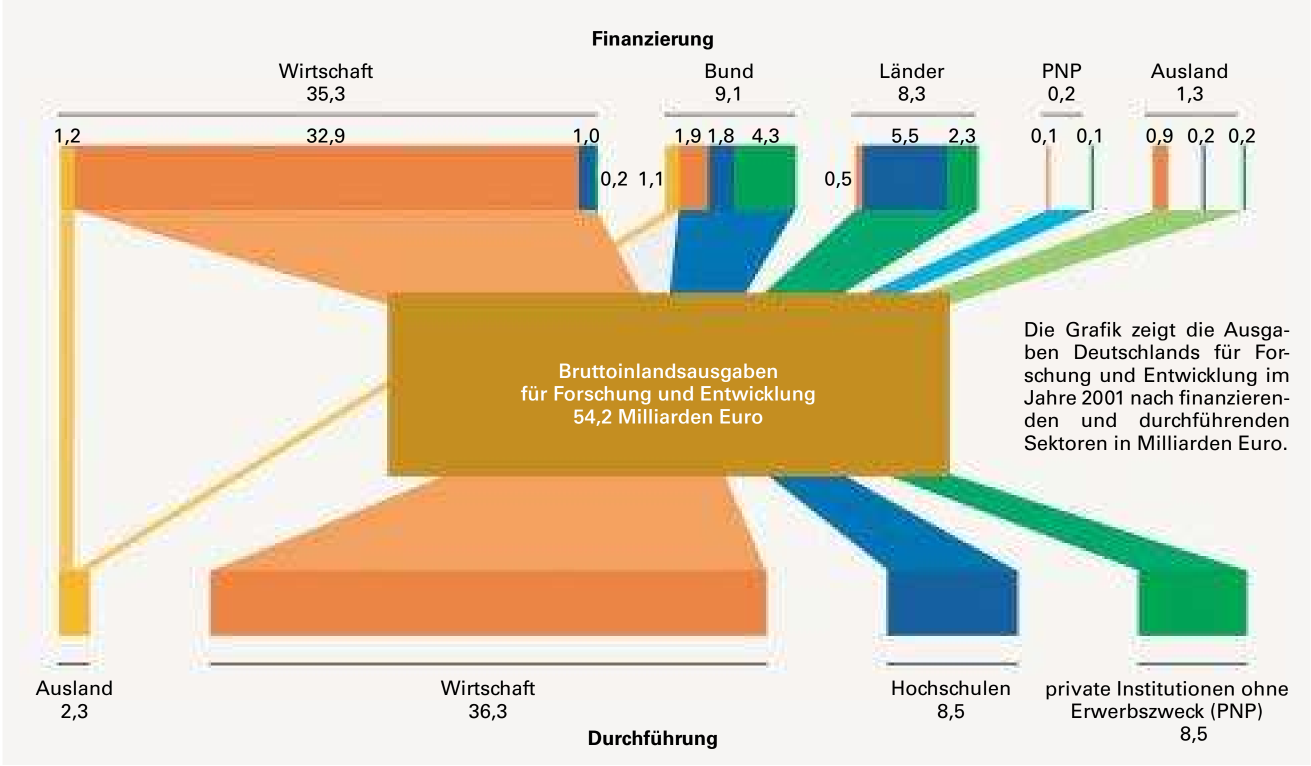
Sie relativiert sich allerdings, wenn man sie mit den Anstrengungen der Wirtschaft vergleicht. Kaum jemand weiß, dass die Industrie gut viermal so viel Geld in Forschung und Entwicklung steckt wie der Bund und somit die tragende Säule der deutschen Forschung bildet. Außerdem hat sie ihre Ausgaben in der Fünfjahresfrist gleich um mehr als zwanzig Prozent erhöht: von 30,3 auf 36,8 Milliarden Euro. Die Steigerungsrate ist also fast doppelt so hoch wie die des Bundesforschungsministeriums.

Nur dem hohen Anteil der Wirtschaft ist es auch zu verdanken, dass im vergangenen Jahr die Ausgaben für Forschung und Entwicklung immerhin 2,52 Prozent vom Bruttoinlandsprodukt ausmachten. Der Bund selbst steuerte lediglich vier Promille bei, was im Übrigen fast identisch ist mit dem, was Bund, Länder und Gemeinden zusammen für die Kultur ausgeben.

Es wäre nur fair, dass die Regierung die Anstrengungen der Wirtschaft anerkennt. Doch sucht man einen solchen Hinweis in der Presseverlautbarung des Forschungsministeriums vergeblich. Dabei kann Deutschland natürlich auch nicht ohne die Hilfe der Wirtschaft das Drei-Prozent-Ziel erreichen. Denn selbst wenn die Regierung jährlich eine zusätzliche Milliarde Euro in Forschung und Entwicklung investierte – was angesichts der leeren Staatskasse illusorisch ist –, bliebe die Messlatte in weiter Ferne. Eines aber darf man zumindest vom Staat erwarten: dass er in den kommenden Jahren wenigstens mit den Steigerungsraten der Wirtschaft mithält. Nur dann gerät das Drei-Prozent-Kriterium in greifbare Nähe. Alles andere wäre reines Lippenbekenntnis.

Gerhard Samulat

Der Autor ist freier Journalist für Wissenschaft und Technik in Wiesbaden.



Die Grafik zeigt die Ausgaben Deutschlands für Forschung und Entwicklung im Jahre 2001 nach finanzierenden und durchführenden Sektoren in Milliarden Euro.

Das lebende Riff ist eine Art dünner Überzug auf einem harten Skelett aus Kalkstein, das die Korallen (Polypen) und die mit ihnen zusammenlebenden Algen (Zooxanthellen) als Nebenprodukt ihres Wachstums bilden. Es türmt sich im Laufe der Jahrtausende zu einem mächtigen Sockel auf. Kalk besteht chemisch aus Kalziumkarbonat ($CaCO_3$). Er bindet somit pro Kalzium-Atom ein Molekül Kohlendioxid. Insgesamt entzieht die Lösung von Kalzium aus Silikatgestein und seine Abscheidung im Meer der Atmosphäre also Kohlendioxid. Wie aber können Korallen dann im Gegenteil bei der Bildung ihres Kalkgerüstes das Treibhausgas freisetzen?

Der Kreislauf des Kohlenstoffs

Der Grund liegt darin, dass der Gesamtvorgang in zwei Schritte zerfällt. Im ersten, der Verwitterung, löst kohlensaures Regenwasser Kalzium aus Silikatgestein heraus und verwandelt es in Kalziumhydrogenkarbonat [$Ca(HCO_3)_2$]. Wie man der Formel entnehmen kann, bindet ein Kalzium-Atom dabei gleich zwei Moleküle Kohlendioxid. Wenn Korallen und andere Organismen das ins Meer gespülte lösliche Kalziumhydrogenkarbonat dann als Kalk abscheiden, wird eines der beiden Kohlendioxidmoleküle wieder frei. Dieses löst sich zunächst im Meerwasser, kann aber nach relativ kurzer Zeit in die Atmosphäre entweichen. Tatsächlich maßen japanische und französische Wissenschaftler in der Luft über Korallenriffen deutlich erhöhte Kohlendioxidwerte.

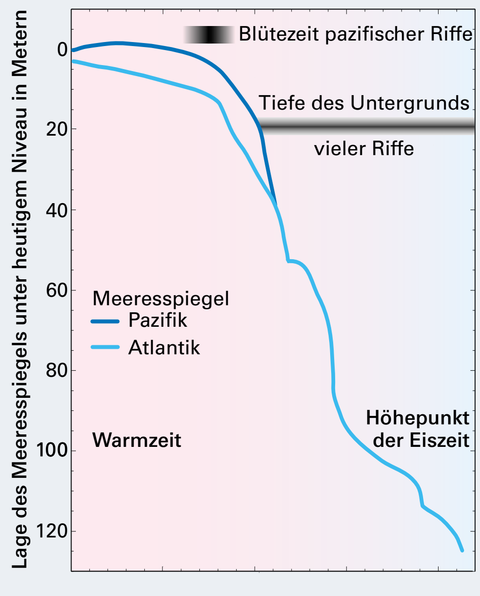
Berger und ich haben nun die Kalkfällungsraten durch die Riffkorallen während der vergangenen 14 000 Jahre abgeschätzt. Das war keineswegs einfach. Noch immer wirkt sich negativ aus, dass die marinen Geowissenschaften ein relativ neues Fach sind, das bis zu den 1970er Jahren ein Schattendasein führte.

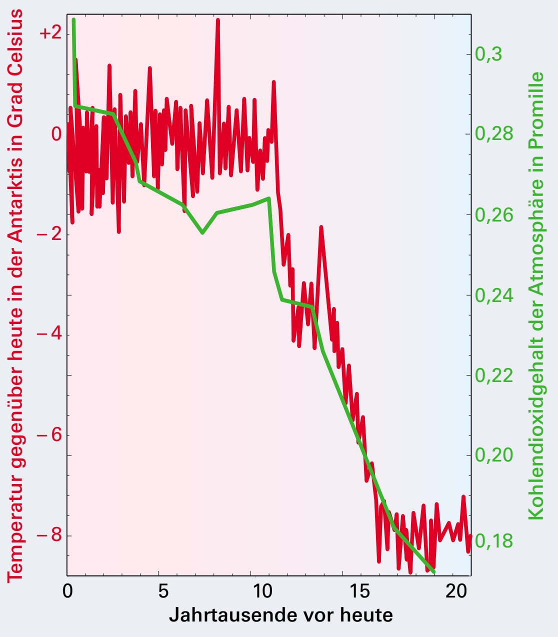
Bezeichnend für den späten Fortschritt auf diesem Wissensgebiet ist, dass die Gesamtfläche der Korallenriffe erst 1997 bekannt wurde: ungefähr 285 000 Quadratkilometer. Bei üblichen Fällungsraten von 1,5 bis 3 Kilogramm je Quadratmeter und Jahr werden also jährlich im Durchschnitt etwa 640 Millionen Tonnen Kalziumkarbonat abgelagert und dabei über 280 Millionen Tonnen Kohlendioxid ins Meer freigesetzt. Auch wenn davon nur ein Teil in die Atmosphäre gelangt, verdeutlicht die schiere Größe dieser Zahl die Bedeutung der Riffe für den Kreislauf des Kohlenstoffs.

Doch wie sah es in der Vergangenheit aus? Als das Eis vor 20 000 Jahren zu schmelzen begann, stieg der Meeresspiegel zunächst zu schnell an, als dass sich Korallen, die nur im seichten, lichtdurchfluteten Wasser gedeihen, dauerhaft hätten ansiedeln können. Der Untergrund der meisten heutigen Riffe, die zu über neunzig Prozent im Indopazifik ▷

▲ Riffe wie dieses auf den Malediven sind die artenreichsten marinen Ökosysteme. Die Korallentiere bilden nur einen dünnen Überzug auf einem harten Skelett aus Kalkstein, den sie bei ihrem Wachstum ausscheiden.

Auftauchen aus der Eiszeit





Die letzte Eiszeit endete vor etwa 10000 Jahren. In den Jahrtausenden davor erwärmte sich die Atmosphäre stark und schnell, ihr Kohlendioxidgehalt nahm erheblich zu, und das abtauende Eis ließ den Meeresspiegel weltweit steigen. Erst dadurch wurden die weiten Tieflandregionen überflutet, auf denen sich Korallen ansiedeln konnten. Vor etwa 9000 bis 6000 Jahren erlebten daher insbesondere die pazifischen Riffe ihre Blütezeit.

Seither hat sich die Entwicklung verlangsamt; allerdings schoss die Kohlendioxidkonzentration in der Luft seit Beginn der Industrialisierung in die Höhe.

A. VECSEI UND W. H. BERGER / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

wachsen, wurde erst während der vergangenen 10000 Jahre überflutet.

Lucien Montaggioni vom Centre National de la Recherche Scientifique in Marseille fand durch die Auswertung von Bohrkernen und mittels anderer Daten heraus, dass diese Riffe im frühen Holozän – vor 9000 bis 6000 Jahren – ihre Blütezeit erlebten. Damals waren die Bedingungen für sie ideal, weil sich ihre Wachstumsgeschwindigkeit und das Tempo des Meeresspiegel-Anstiegs vielerorts gerade die Waage hielten. Seither haben viele Riffe – darunter das Große Barrier-Riff Australiens – den Meeresspiegel erreicht und können nur noch stark eingeschränkt weiterwachsen. Entsprechend hat die Fällungsrate von Kalk deutlich abgenommen.

Bei unserer Abschätzung stützten wir uns auf ein numerisches Modell der einstigen Riffverteilung, das Joan Kleypas vom National Center for Atmospheric Research in Boulder (Colorado) aufgestellt hat. Die Sedimentationsrate setzten wir mit einem Kilogramm pro Quadratmeter und Jahr sehr konservativ an. Für die Blütezeit der Riffe im älteren Holozän verdoppelten wir diesen Wert.

Unter diesen Voraussetzungen ergab sich für die vergangenen 14000 Jahre eine gesamte Riffkalk-Ansammlung von etwa 2900 Milliarden Tonnen und eine Kohlendioxidabgabe an die Atmosphäre von 210 Milliarden Tonnen Kohlenstoff. Umgerechnet auf den Kohlendioxidgehalt der Lufthülle entspricht das ungefähr hundert ppm. Das Riffwachstum allein könnte demnach den gesamten Anstieg in der Kohlendioxidkonzentration der Lufthülle während der letzten 20000 Jahre erklären.

Überschuss statt Fehlbetrag im Kohlendioxid-Budget

Tatsächlich fehlen im Budget, wie oben berechnet, aber lediglich 50 ppm. Damit haben wir es statt mit einem Fehlbetrag plötzlich mit einem ebenso hohen Überschuss zu tun. Verschärfend kommt hinzu, dass verkalkendes Plankton vermutlich ebenso viel Kohlendioxid abgab wie die Korallen. Möglicherweise ist ein großer Teil des im flachen Meer freigesetzten Treibhausgases nicht in die Atmosphäre entwichen, sondern wurde in das Tiefenwasser untergemischt, von wo es, wenn überhaupt, erst mit großer Verzögerung in die Lufthülle gelangen kann.

Zudem existieren wahrscheinlich bedeutende Kohlenstoff-Senken an Land – etwa große Torfansammlungen –, die Sigman und Boyle in ihrer Abschätzung nicht berücksichtigt haben. Auch sollte sich mit der allmählichen Erwärmung und dem Schwinden der Gletscher die Verwitterung beschleunigt haben, wodurch der Luft vermehrt Kohlendioxid entzogen wurde.

NACHGEHAKT

Übergewicht und Elend

Viele Menschen sind zu dick. Aber wie viele genau? Darüber lässt sich trefflich streiten. Wenn die statistische Verteilung des Körpergewichts annähernd einer Gauß'schen Glockenkurve folgt, liegt sie zur Hälfte rechts vom Mittelwert, und automatisch ist man bei der Hiobsbotschaft: Jede(r) Zweite hat Übergewicht. Definieren unterschiedliche Institutionen extreme Fettlebigkeit als das, worunter die schwersten fünfzehn, zehn oder sieben Prozent der Menschen leiden, kommen entsprechend mehr oder weniger Fettsüchtige heraus.

Mit solchen Argumenten gab die »Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung« Ende Juni Entwarnung: Die Fettleibigkeits-Epidemie bei Kindern in Deutschland, wegen der Verbraucherministerin Renate Künast kurz zuvor Alarm geschlagen hatte, sei ein Phantom. Darf also die Couch Potato erleichtert seufzen: »Alles nur eine Frage der Statistik« – und sich vor dem Fernseher weiter mit Chips, Schokoriegeln und süßer Limonade den Wanst voll schlagen?

Immerhin warnte Anfang Juni der Chefredakteur der renommierten Fachzeitschrift »Science« in einem Editorial, das sein Vorgänger gleich mit unterzeichnet hat, vor einer weltweit um sich greifenden Fettsucht; der nachdrückliche Appell stützte sich auf Erhebungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO), wonach weltweit fast eine Milliarde Erwachsene übergewichtig und mindestens 300 Millionen fettleibig sind. Im Mai verabschiedete die WHO deshalb eine »Globale Strategie für Ernährung, körperliche Aktivität und Gesundheit«, die vor allem empfiehlt, die Einnahme von Fetten, Salz und Zucker zu drosseln.

Generell herrscht auf diesem Gebiet noch erhebliche Unsicherheit. So ist die Rolle des organischen Kohlenstoffs auf den großflächigen Kontinentalschelfen und in den Süßwasserseen nicht einmal so weit geklärt, dass man definitiv wüsste, ob diese Bereiche Quellen oder Senken von atmosphärischem Kohlendioxid sind. Erst nach Beantwortung solcher grundsätzlichen Fragen werden wir die Zu- und Abflüsse von Kohlenstoff bezüglich der Atmosphäre endgültig bilanzieren können. Dass die Korallenriffe einen Beitrag zum sich verstärkenden Treibhauseffekt seit dem Ende der Eiszeit leisteten, steht nach unseren Berechnungen jedoch außer Frage. ◁

Adam Vecsei ist promovierter Geologe und Privatdozent an der Universität Leipzig.

Auf die WHO-Studie berief sich auch die Verbraucherministerin, als sie im Juni ihre »Initiative für eine neue Ernährungsbewegung in Deutschland« startete. Jedes fünfte Kind und jeder dritte Jugendliche in Deutschland seien übergewichtig, so Künast, mehr als sieben Prozent der Kinder litten an krankhafter Adipositas (Fettsucht).

Gewiss, alle genannten Zahlen sind statistische Schätzungen und wurden in den USA und in Deutschland auch gleich als wissenschaftlich umstritten kritisiert. Doch an der von Nahrungswissenschaftlern beobachteten Tendenz ist kaum zu rütteln: In aller Welt wächst die Anzahl der Dicken – am meisten in den USA, wo der europäische Besucher längst ein erstaunliches Nebeneinander von Korpulenz, Körperkult und Diätbewusstsein vorfindet; aber auch Europa folgt diesem Trend.

Besondere Sorge macht der WHO, dass die fatalen Folgen falscher Ernährung – Diabetes, Herz- und Kreislauferkrankungen, Krebs – nun auch die Entwicklungsländer zu erfassen beginnen. Die Nachkommen der Maya in Guatemala, die Schwarzen Südafrikas, die australischen Aborigines und die Bewohner der Pazifik-Inseln leiden bereits unter den Folgen von kalorienreicher Nahrung und Bewegungsarmut.

Aus der globalen Diagnose folgt in diesem Fall die Therapie eigentlich von selbst: weniger Kalorien aufnehmen und sich mehr bewegen. Doch das ist leichter gesagt als getan. Mit perfider Raffinesse setzt die Nahrungsmittelindustrie ihre suggestivsten Werbemittel ein: der Hamburgerladen als Szenetreff, der Pausensnack als Glücksbringer. Nicht Übergewichtige sind es, sondern schlanke, schöne Menschen, die sich in der Fernsehwerbung verführerisch Kalorienbomben zwischen die Lippen schieben.

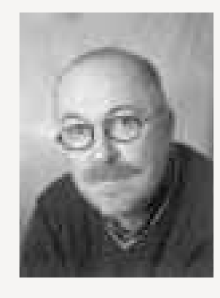
Vielleicht wird sich die Essenswerbung bei tatsächlich steigendem Ernährungsbewusstsein bald hüten, Menschen beim Kauen zu zeigen – so wie die Zigarettenwerbung den Marlboro-Mann zwar Pferde bändigen, aber keinen Lungenzug mehr machen lässt.

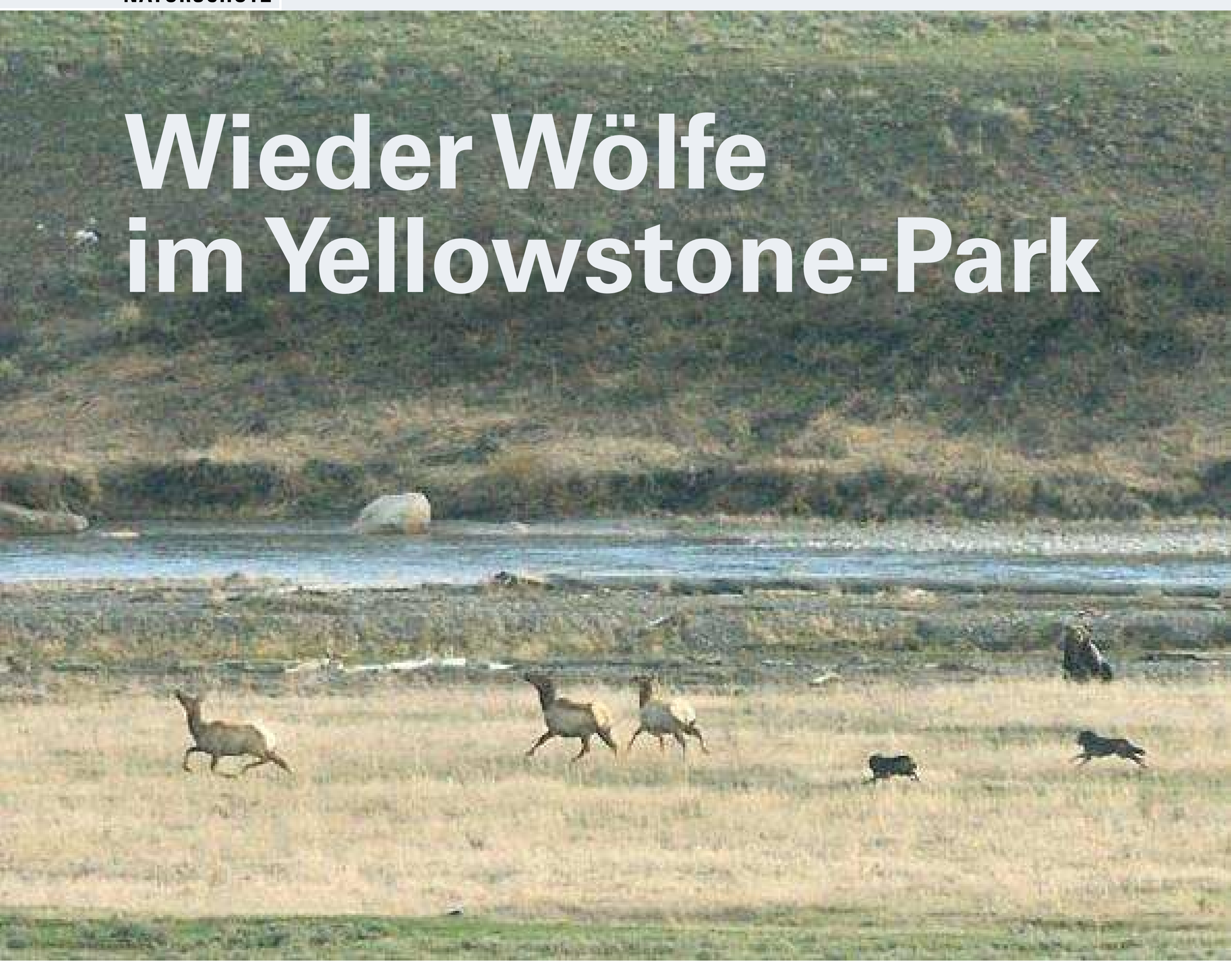
Glück kann man nicht essen. Wer weiß schon, wie viel Übergewicht in Wahrheit Kummerspeck oder Angstpanzer ist, trauriges Kompensieren von mangelnden Chancen und fehlendem sozialem Gewicht? Unbestritten ist jedenfalls, dass Fettsucht mit niedrigem Sozialstatus und geringem Bildungsniveau korreliert ist. Nachgewiesen wurde auch ein Zusammenhang zwischen exzessivem Fernsehkonsum – einer einsamen Beschäftigung – und Übergewicht.

Global betrachtet leben an beiden Rändern der statistischen Körpergewichtskurve Unglückliche: am linken Rand die Hungernden und am anderen Ende die Vielesser. Appelle an das individuelle Ernährungsverhalten wären in dem einen Fall offensichtlich zynisch, im anderen sind sie es vielleicht auch. So wie die einen Nahrung brauchen, um endlich satt zu werden, brauchen die anderen soziale Perspektiven, reelle Chancen und attraktive Angebote, die sie aus dem Fernsehsessel holen.

Michael Springer

Der Autor ist ständiger freier Mitarbeiter bei Spektrum der Wissenschaft.





Wieder Wölfe im Yellowstone-Park

Seit im Yellowstone-Nationalpark in den USA wieder Wölfe leben, regeneriert sich das Ökosystem verblüffend schnell. Auf die neue Situation reagierten unerwartet viele Tier- und Pflanzenpopulationen – aber nicht alle gleich.

Von Jim Robbins

Normalerweise geraten Ökologen angesichts von ein paar mickrigen Pappeln nicht gleich in Begeisterung. Doch dem Botanikprofessor William J. Ripple von der Oregon State University in Corvallis sieht man die helle Freude an. Die Lesebrille auf der Nase, beäugt er aus nächster Nähe die paar kaum doppelt mannshohen Bäumchen, deren Gezweig der Wind an diesem Augusttag 2003 kräftig durchpustet.

Diese jungen Pappeln – in Amerika *cottonwood* genannt – wachsen im Lamar Valley, einem der schönsten Täler des Yellowstone-Nationalparks, das sich im Nordosten des um die 200 Meter hoch gelegenen Refugiums erstreckt. »Man sieht die Narben der Gipfelknospe«, erklärt Ripple verzückt. Er hat den dünnen Stamm eines der Bäumchen heruntergebogen und deutet auf Linien im Abstand von vielleicht dreißig Zentimetern, die das jährliche Wachstum anzeigen. »Das heißt: Die Wapitis haben den Baum in diesem Jahr nicht verbissen und auch letztes Jahr nicht. Seit 1998 haben sie ihn in Ruhe gelassen.« Mit Wapitis meint Ripple die sehr großen Rothirsche Nordamerikas, eine eigene Unterart.

Der Ökologe weist über das weite Gebirgstal, in dem um uns her viele alte Pappeln verstreut stehen. Jungwuchs dagegen sieht man von hier aus nur an die-


DIANE HARGREAVES

ser einen Stelle. Die stattlichen Exemplare der Talsohle zählen sämtlich mindestens 70 bis 100 Jahre. Ein ähnliches Bild bieten die Zitterpappeln auf den Hängen – wie die europäische Zitterpappel wird auch diese amerikanische Art Espe *(aspen)* genannt. Nirgends wachsen dazwischen Schösslinge, die den Bestand einmal verjüngen könnten.

Nach Ansicht mancher Fachleute wären diese prägenden Pappelarten irgendwann aus dieser Landschaft verschwunden, hätte man im Yellowstone-Park nicht wieder Wölfe ausgesetzt. Noch als das hoch gelegene Naturschutzgebiet am Ostrand der Rocky Mountains (siehe Karte S. 26) 1872 eingerichtet wurde, jagten Wolfsrudel dort vor allem Wapitis. Doch bis 1930 war die Population ausgerottet – damals in voller Absicht, denn Wölfe galten als bedrohlich. Durch die Wiedereinbürgerung dieses obersten Räubers in den Nahrungsketten Mitte der 1990er Jahre werden nun ökologische Wechselwirkungen deutlich, die selbst Experten vielfach so nicht erwartet hätten.

Die neuen Wölfe stammten aus zwei Gebieten der kanadischen Rocky Mountains. Mitten im Winter 1995/96 brachten die Nationalparkverwaltung und die US-Behörde für Fischerei und Wildtiere die ersten 14 Tiere dorthin. Ein Jahr später wurden weitere 17 Wölfe übersiedelt. Diese großen Fleischfresser würden, so die Hoffnung, wieder natürlichere ökologische Verhältnisse schaffen. Unter anderem erwartete man, dass sie die Bestandsdichte der Wapitis verringern und auf einem niedrigeren Level halten würden.

▲ Vorfrühling im Lamar-Tal des Yellowstone-Nationalparks: Wölfe jagen Wapitis, die großen amerikanischen Rothirsche. Ein Grizzly beobachtet das Geschehen. Vielleicht wird er die Wölfe nachher vom erlegten Wild verjagen. Oder er macht sich erst später über die Reste her.

Nachdem in dem Gebiet keine Wölfe mehr vorkamen, hatte sich die Rothirsch-Unterart rasch stark vermehrt. Zeitweise regulierte der Mensch den Bestand, zeitweise machten auch harte Winter den Tieren zu schaffen. Aber um ▷

▷ 1990 beispielsweise lebten in Yellowstone um die 20000 Rothirsche. Die Wölfe enttäuschten nicht. Sie vermehrten sich gut und bilden heute 16 Rudel aus im Durchschnitt etwa zehn Tieren. Grob gerechnet reißt eine Gruppe dieser Größe einen Wapiti pro Tag. Tatsächlich ist deren Population inzwischen nur halb so groß wie vor 15 Jahren.

Canis lupus als Landschaftspfleger

Andere Entwicklungen hatten die Biologen nicht vorhergesehen. Sie staunen beispielsweise, wie sehr sich mancherorts die Landschaft umgestaltet und wie deutlich die Wölfe offenbar schon nach so kurzer Zeit auf einige Tierbestände und den Pflanzenwuchs Einfluss nehmen. Inzwischen verfolgen und untersuchen Wissenschaftler aus den gesamten Vereinigten Staaten diese Auswirkungen. »Wie es hier aussieht, so gestalten das die Wölfe«, betont denn auch der Leiter des Yellowstone-Wolfprojekts Douglas W. Smith. »In dreißig Jahren wird man den Nationalpark kaum wiedererkennen.«

Ripple seinerseits hofft besonders auf Baumnachwuchs. Am meisten erwartet er sich von den Zitterpappeln. Diese Espen seien im amerikanischen Westen Brennpunkte der Artenvielfalt. Sie böten einer ganzen Palette von Singvögeln Lebensraum. Ripple kam 1997 nach Yellowstone, weil er erfahren hatte, dass diese Baumart im Nationalpark zurückging, aber niemand den Grund dafür kannte. Der Botaniker zeigt alte Schwarz-Weiß-Fotos, die im Lamar-Tal jeweils von derselben Stelle aus aufgenommen wurden. Anfang des 20. Jahrhunderts waren noch viele junge Zitterpappeln und Weiden zu sehen. Nach 1930 fehlten die Jungpflanzen. »Die Bestände haben sich nicht mehr regeneriert«, lautet Ripples Kommentar dazu.

»Als ich diese Bilder sah, ging mir ein Licht auf«, fährt er fort. Da er einen Verdacht hegte, entnahm er zunächst den Stämmen von an die hundert großen Zitterpappeln Bohrproben, um anhand der Jahresringe ihr Alter zu bestimmen. Und tatsächlich waren seit 1930 nur zwei der Bäume neu gewachsen. Alle anderen stammten aus den Zeiten, als in Yellowstone noch nennenswerte Wolfsbestände umherstreiften. Bemerkenswerterweise standen die beiden jüngeren Espen in besonders unübersichtlichem Gelände, wo Raubtiere sich gut hätten verstecken können und das Wapitis deswegen wohl instinktiv mieden. Ripple erzählt auch noch, dass er zu Beginn seiner Arbeit außer den alten Espen nur sehr junge Schösslinge vorfand. Dazwischen klaffte eine Lücke von über sechzig Jahren.

Das war der erste konkrete Hinweis auf den vermuteten »Wolfeffekt«: Der Wapitibestand in Yellowstone wurde früher von der Wolfspopulation so niedrig gehalten, dass diese Hirsche einen Teil des Baumjungwuchses verschonten. Sobald die Wapitis dem herkömmlichen Feinddruck nicht mehr ausgesetzt waren, so die These, und sie sich deswegen übermäßig vermehrten, litt die Vegetation der verschiedenen Pappeln und Weiden dermaßen unter dem verstärkten Fraß, dass das Lamar-Tal einen ganz anderen Charakter bekam.

Rückkehr der Biber

Unter dem kargen Baumangebot litten auch andere Arten, etwa die Biber. Diese Nager brauchen junge Bäume als Nahrung und für ihre Gewässer regulierenden Bauten. Sie verschwanden aus dem Nationalpark spätestens in den 1950er Jahren. Ohne sie fehlen aber die aufgestauten Wasserflächen. Das wiederum dezimiert die Vegetation feuchter Standorte, wo die Grizzlys sich nach dem Winterschlaf wieder Kraft anfuttern.

Viele dieser Veränderungen scheinen sich nun zurückzuregulieren. So schnell

Kanadische Wölfe für Yellowstone

Die im Yellowstone-Park ausgesetzten Wölfe stammen aus zwei Gebieten in den kanadischen Rocky Mountains. Diese Wolfspopulationen sind gewohnt, Wapitis zu jagen – anders als einige Rudel in Montana, die sich auf kleinere Hirscharten verlegt haben.

Insgesamt 31 Wölfe trafen in den Wintern 1995/96 und 1996/97 ein. Zunächst lebten sie zwei Monate in großen Wildgehegen, um sich an die neue Umgebung zu gewöhnen. Obwohl Wölfe ohnehin den Menschen meiden, wurde Sorge getragen, dass sich Kontakte auf das Allernotwendigste beschränkten. Damit sich bald funktionsfähige Rudel bildeten, sollten manche Tiere sich kennen. Andererseits war es unter genetischen Aspekten wichtig, Tiere aus verschiedenen Gebieten und Gruppen auszusetzen.

Die Wölfe haben sich mittlerweile gut vermehrt. Im letzten Winter zählten die Ranger 16 Rudel mit insgesamt rund 170 Tieren. Die Behörden möchten die Population nun von der Liste der geschützten Arten nehmen. Dann dürften die Farmer angrenzender Gebiete Wölfe schießen, die außerhalb der Schutzzone Schaden anrichten. Manche der beteiligten Forscher halten die Maßnahme allerdings für verfrüht.

LUCY READING UND NINA FINKEL



Wölfe sind nun im Yellowstone-Park die obersten Raubtiere. Davon profitieren viele andere Fleischfresser, von den Grizzlys bis zu den Kolkraben.

sich die ausgebrachten Wölfe vermehrt haben, so schnell nahm offenbar die Zahl der Wapitis ab – und die Vegetation zu. Das dokumentieren Ripple und sein Kollege Robert L. Beschta, Forstwissenschaftler und Gastforscher an der Oregon State University. Sie verzeichneten sowohl viele mehrjährige Pappeln als auch Weiden, beides Anzeichen, dass sich die betreffenden Arten nach siebzig Jahren erstmals regenerieren können.

Auf einer Wanderung entlang dem Lamar-Fluss schiebt Ripple hinter einer kleinen Anhöhe die dicht herabhängenden Zweige einer Weide auseinander. Zum Vorschein kommen der ausgebleichte Schädel, Rippen und Rückgrat eines Wapitis. Nicht sehr weit von hier hat ein Wolfsrudel seinen Bau. Die Weidenbüsche rundum wachsen bereits drei Meter hoch und mehr.

Offenbar stellen sich die Wapitis in ihrem Äsungsverhalten schon auf die neue Gefahr ein. Die hoch gewachsenen, über 300 Kilogramm schweren, eleganten rötlich braunen Wiederkäuer suchen heute seltener als früher Flussniederungen auf. Dafür sieht man sie öfter an rundum übersichtlichen Stellen. Auch das hat auf die Vegetation Einfluss: Am stärksten wuchert es auf Flächen, wo die Rundumsicht fehlt. Zum Beispiel liegt die Stelle mit dem Weidengebüsch in einer Kuhle hinter einem kleinen Hügel. Hier zeigt ein genauerer Blick, dass die Weiden seit mehreren Jahren praktisch überhaupt nicht mehr verbissen wurden.

Wapitis würden sich hier unsicher fühlen, behauptet Ripple. Sie könnten eben nicht alles sehen, was in der Nähe vorgeht. Nur 50 Meter entfernt sind die Weiden dagegen bis auf weniger als einen Meter Höhe abgeäst. Dort gewährt das ebene Gelände ihnen einen Panoramablick. In den letzten drei Jahren haben die Hirsche hier oft gefressen. »Die Ökologie der Angst!«, meint Ripple.

Außerdem kehren die Biber zurück. Ein Stück weiter flussaufwärts haben sie einen Damm gebaut. Insgesamt drei der Bauwerke zieren nun den Lamar – erstmals wieder seit über 50 Jahren. Den Slough Creek, einen Nebenfluss des Lamar, stauen schon sechs Dämme. Ripple und Smith führen auch das auf die neue Vegetation zurück. Die großen Nager würden hier offenbar wieder Futter finden. »Ihre Vorratskammern sind voller Weidenzweige«, erzählt Smith.

Kojoten als Verlierer

Des Weiteren erwarten die Forscher Auswirkungen auf die Ökologie des Lamar. Wenn erst entlang dem Fluss Gehölze wuchern, würde das seine Ufer stabilisieren und manchmal Erosionen aufhalten. Eine dichtere Vegetation würde ihn zudem beschatten: Dann bliebe das Wasser in Sommer kühler. Mehr Gehölz bedeutet zugleich mehr Totholz, das in den Fluss fällt oder gespült wird. An manchen Stellen bremst es die Strömung. Von gestauten, ruhigen Abschnitten profitieren etwa Forellen.

Insgesamt scheinen die Wölfe ganz unterschiedliche ökologische Posten im Yellowstone-Park zu beeinflussen. Dramatisch sind die Auswirkungen für die Kojoten, die um einiges kleiner sind als Wölfe (siehe Bild S. 28). Das Biologenehepaar Robert Crabtree und Jennifer Sheldon begann deren Populationsentwicklung drei Jahre vor der Wiedereinführung der Wölfe zu beobachten. Crabtree ist heute leitender Wissenschaftler am Yellowstone Ecological Research Center, einer Non-Profit-Organisation mit Sitz in Bozeman (Montana).

Wie die beiden Forscher feststellten, hat sich die Zahl der Kojoten im Yellowstone-Park im letzten Jahrzehnt halbiert. Offenbar mussten diese ebenfalls hundeartigen Raubtiere der übermächtigen Konkurrenz weichen. In zentralen Wolfsgebieten sank ihre Zahl sogar um 90 Prozent. Die jetzigen Männchen sind außerdem insgesamt etwas kleiner als früher. Crabtree vermutet, dass die größten Tiere wohl auch am aggressivsten waren. Vielleicht griffen sie die Wölfe an, zogen dabei aber den Kürzeren.

Da Kojoten vor allem kleine Nager fressen, explodieren nun deren Populationen. Hiervon wiederum profitieren der Rotfuchs und Raubvögel. Die Kehrseite: Der Rotfuchs erbeutet auch kleinere Vögel. Deren Bestände könnten leiden, wenn die Rotfüchse zunehmen.

Manchen mag es verwundern, dass Wölfe eine Reihe anderer Fleischfresser mit Nahrung versorgen. Zwar greifen ▷

IN KÜRZE

- Im Yellowstone-Nationalpark wurden Mitte der 1990er Jahre über **dreißig Wölfe** aus Kanada ausgesetzt, die sich inzwischen schon stark vermehrt haben – 70 Jahre nach der Ausrottung der letzten angestammten Tiere.
- Seitdem scheint sich die Vegetation zu erholen. Nach Jahrzehnten wachsen wieder **Jungbäume** nach. Forscher schreiben dies den Wölfen zu, die den Bestand der **Wapitis** – der nordamerikanischen Rothirsche – offenbar halbiert haben.
- Die **Lebensbedingungen** zahlreicher weiterer Tierarten haben sich ebenfalls verändert, angefangen beim Kojoten und dem Rotfuchs, dem Grizzly und dem Biber bis hin zum Kolkraben und den Singvögeln.



LINKS: JESS R. LEE; RECHTS: DONALD M. JONES



Die Wapitikuh sichert rundum, während sie ihr Kalb säugt. Seit Wölfe den Yellowstone-Nationalpark wieder besiedeln, verschwinden viel mehr Kälber als früher. Die Wapitipopulation ist auf die Hälfte geschrumpft.

Zu den Verlierern gehören die Kojoten. Ihr Bestand hat sich halbiert. Trotzdem hat hier einer die Chance, an einem von Wölfen gerissenen Wapiti zu fressen. Neben Elstern (im Bild) finden sich in der Regel auch Kolkraben ein.

Grizzlys und Pumas einen ausgewachsenen Wapiti selten an. Mitunter töten sie allerdings Kälber, und im Winter fressen sie auch verendete große Hirsche. Dagegen reißen Wölfe zu jeder Zeit auch Alttiere. An einem Riss bekommen die anderen Arten ihre Chance, wenn sich die Wölfe voll gefressen haben und den Kadaver für einen Verdauungsschlaf verlassen. Grizzlys gelingt es sogar nicht selten, das Rudel von der Beute zu vertreiben.

Fleischlieferanten für andere Arten

Seit die Wölfe wieder in Yellowstone jagen, sind insgesamt viel mehr große Tierkadaver als vorher verfügbar, an denen sich praktisch alle dort lebenden Aasfresser verköstigen. Das spiegelt sich in ihren gestiegenen Populationen wider, vom Grizzly bis zur Elster. Einmal wurden an einem Wolfsriss 135 Kolkraben gezählt, ein Rekord. »Wo immer ein Rudel einen Wapiti erlegt hat, finden sie sich alle ein: Weißkopfseeadler, Steinadler, Kojoten, Kolkraben, Elstern«, notiert Smith. »Ich möchte wissen, was die früher gemacht haben.«

Allerdings gehen die Meinungen auseinander, ob Wölfe wirklich einen so beherrschenden Einfluss auf ein Ökosystem haben können, wie viele der Wissenschaftler derzeit glauben. Laut Smith bedeuten diese Topraubtiere für Yellowstone so viel »wie Wasser für die Everglades«, das berühmte Feuchtrefugium in Florida. Sie seien eben ein Primärfaktor, der das Ökosystem forme.

Der Banff-Nationalpark in den Südkanadischen Rocky Mountains nahe bei Calgary bietet dafür ein Beispiel. Dorthin kehrten Wölfe in den 1980er Jahren von selbst zurück. Nun wachsen wieder Weiden, und es gibt doppelt so viele Singvögel, auch doppelt so viele Arten. Auf ähnliche Entwicklungen hoffen Ornithologen und andere Naturfreunde nun auch für Yellowstone. Um die ersten Anzeichen nicht zu verpassen, wenn sich Flora und Fauna der Flussufer ändern, und dies zu dokumentieren, laufen mindestens sechs ökologische Projekte.

Doch nicht jeder der Forscher glaubt an den Wolfeffekt. Crabtree zum Beispiel hält es keineswegs für erwiesen, dass die Wiederansiedlung von Wölfen so eng mit dem neuen Pflanzenwachstum korreliert wie behauptet. Das einfach zu behaupten, sei schlechte Wissenschaft. »Das Ökosystem von Yellowstone ist ein multikausales interaktives System. Für nichts gibt es hier eine einzige Ursache – und selbst eine Hauptursache in den wenigsten Fällen. Gerade als die Wölfe sich wieder breit machten, gab es am Fluss Überschwemmungen. Außerdem ist das Klima derzeit viel wärmer. Die Wölfe spielen bei den Veränderungen vermutlich auch eine Rolle, aber welche genau, werden wir erst in frühestens zwanzig Jahren wissen.«

In dieser Richtung argumentiert auch der Ökologe Duncan Patten, ehemals Professor der Arizona State University in Tempe. Für die amerikanische Nationale Akademie der Wissenschaften







LINKS: DIANE HARGREAVES; RECHTS: DONALD M. JONES

Siebzig Jahre lang wuchsen im Lamar-Tal praktisch keine jungen Pappeln nach – hier die als *cottonwood* bezeichnete Art. Jetzt verzeichnen die Forscher wieder mehrjährige Jungbäume.

Dass Biber nach fünfzig Jahren wieder im Yellowstone-Nationalpark siedeln, dürfte vor allem auf das jetzt dicht wachsende Weidengebüsch zurückgehen. Die Dämme dieser Nager helfen, die Landschaft reicher zu gestalten.

führte er im Yellowstone-Park eine 2002 erschienene Studie durch. Seit dort Wölfe in größerer Zahl lebten, bemerkt er, habe es keine harten Winter gegeben. Vielleicht fanden die Wapitis genügend anderes Futter und mussten nicht auf junge Bäume ausweichen. »Zwei wirklich strenge Winter hintereinander, dann glaube ich an den Wolfeffekt.«

Die Debatte facht einen jahrzehntelangen Streit wieder an, nämlich darüber, wie die Wapitibestände des Naturparks richtig zu managen seien. Es gab eine Zeit, da nahm bei der Parkverwaltung die Meinung überhand, die Rothirsche hätten sich zu stark vermehrt. In den 1960er Jahren fingen und schossen Ranger die Hirsche zu Tausenden. Bis 1970 betrug deren Zahl schätzungsweise nur noch 4000. Wegen massiver Proteste der Bevölkerung stellten die Verantwortlichen das Abschlachten dann aber wieder ein. Sie entschieden sich nun dazu, der Natur die Regulierung selbst zu überlassen. Nach diesem Konzept sollte das Naturschutzgebiet ein Stück des urtümlichen, vom Menschen wenig berührten Amerika repräsentieren. Die Zahl der Wapitis wuchs wieder.

Die nächsten Jahrzehnte brachten von anderer Seite neue Proteste, diesmal unter anderem von der Regierung des Staates Montana, zu dem ein Streifen des Yellowstone-Parks gehört. Es hieß, es sei Unsinn, die Natur in einer so hochgradig unnatürlichen Situation allein walten zu lassen. Die Wapitibestände seien entschieden viel zu hoch im Verhältnis zur Weidefläche. Das zeige sich besonders in der kalten Jahreszeit. Denn im Winter würden die meisten dieser Rothirsche freiwillig nicht in so großer Höhe bleiben, sondern in tiefere Regionen ziehen. Der Jagddruck außerhalb des Parks dränge sie aber in das um die 2000 Meter hoch gelegene Schutzgebiet.

Auch dazu, wie viele Wapitis natürlicherweise in Yellowstone leben würden, sind die Meinungen geteilt. Nach Ansicht der Parkverwaltung lag der vormals dichte Bestand noch innerhalb der natürlichen Grenzen. Manche Forscher meinen nun, das könne nicht stimmen, wenn man jetzt sehe, wie die Flussufer wieder zuwüchsen. Doch Smith verteidigt das Yellowstone-Management. Große Populationsschwankungen seien bei Wapitis normal. Noch immer seien die Zahlen hoch, und langfristig gesehen hätten auch die Spitzen dazu gepasst.

Streit um die richtigen Maßnahmen

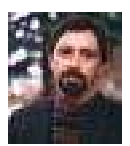
Der Philosoph Alston Chase jedoch kritisiert diese Auffassung heftig. In den 1980er Jahren schrieb er das Buch »Playing God in Yellowstone«, in dem er die Politik der Parkverwaltung, der Natur ihren Lauf zu lassen, niedermachte. Bei Recherchen hätte er keinerlei Hinweise auf frühere hohe Wapitivorkommen in dem Gebiet gefunden. Sie seien erst aufgetreten, nachdem der Naturschutzpark eingerichtet wurde, man die Indianer vertrieb, die Jagd verbot und den Wölfen den Garaus machte.

Wie auch immer – erste Anzeichen könnten wirklich bedeuten, dass die Wölfe sozusagen Naturschutz betreiben. Einfach indem sie in der ihnen gemäßen Weise hauptsächlich Wapitis reißen, verwandeln sie das Ökosystem. Viele der Auswirkungen halten wir Menschen für sinnvoll und wertvoll. Müssten wir selbst regulierend eingreifen, käme uns das reichlich teuer.

Nicht zuletzt lehren uns die Wölfe die Bedeutung großer Raubtiere an der Spitze einer Nahrungskette. Daran erkennen wir, wie viel in Landschaften fehlt, in denen die obersten Fleischfresser nicht mehr vorkommen. Wo sie eingreifen, pflanzt sich der Effekt durch das ganze Ökosystem fort.

Naturfreunden bringen die Yellowstone-Wölfe in einzigartiger Weise bei, wie die vielen Glieder eines solchen Systems ineinander greifen. Dank der akribischen Dokumentation, die in diesem Fall möglich ist, gewinnen verschwommene Vorstellungen über ökologische Beziehungen mehr Klarheit. Somit gestalten diese Wölfe nicht nur den Yellowstone-Nationalpark, sondern sie vermehren auch unser Wissen über die Natur. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Jim Robbins ist freier Wissenschaftsautor. Er lebt in Helena (Montana).

Yellowstone after wolfes. Von Douglas W. Smith et al. In: Bio Science, Bd. 54, Heft 4, S. 330, April 2003

Yellowstone wolfes in the wild. Von James C. Halfpenny. Riverband Publishing, 2003

Cottonwoods, elk and wolfes in the Lamar valley of Yellowstone National Park. Von Robert L. Beschta. In: Ecological Applications, Bd. 15, Heft 5, S. 1295, 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Die Zeit vor dem Urknall

Quantentheorien der Gravitation legen nahe, dass das Universum nicht erst mit dem Urknall begann – ein dramatischer Bruch mit der bisherigen Vorstellung vom Anfang der Zeit. Demnächst verfügbare Instrumente könnten subtile Spuren aus dieser kosmischen Vorzeit nachweisen.

Von Gabriele Veneziano

Begann die Zeit wirklich mit dem Urknall – oder existierte das Universum bereits davor? Noch vor zehn Jahren erschien ein solcher Gedanke geradezu als Blasphemie. Die meisten Kosmologen waren überzeugt, die Frage nach einer Zeit vor dem Urknall sei ebenso sinnlos wie die Suche nach einem Ort nördlich des Nordpols. Doch neuere Entwicklungen in der Theoretischen Physik, insbesondere die Stringtheorie, haben den Blickwinkel der Kosmologen verändert: Das Universum vor dem Urknall ist heute ein respektabler Forschungsgegenstand.

Damit schwingt das Pendel einer geistigen Auseinandersetzung, die in unterschiedlicher Form seit Jahrtausenden unentschieden hin- und herwogt, erneut in eine Richtung aus. In allen Kulturen hat das Problem des Ursprungs das Denken beschäftigt. Es hängt eng mit den großen Menschheitsfragen zusammen, die Paul Gauguin 1897 in seinem berühmten Gemälde *D'où venons-nous? Que sommes-nous? Où allons-nous?* dargestellt hat: Woher kommen wir? Was sind wir? Wohin gehen wir? Das Kunstwerk stellt den Kreislauf von Geburt, Leben und Tod – Ursprung, Identität und Schicksal jedes Individuums – dar, und diese persönlichen Fragen sind unmittelbar mit kosmologischen verbunden. Wir können unsere Herkunft durch die Generationen zurückverfolgen bis zu unseren tierischen Vorfahren und weiter zu den ersten Lebensformen, zu den chemischen Vorformen des Lebens, zu den Elementen, die im frühen Universum synthetisiert wurden, und zu der amorphen Energie, die zuvor den Raum erfüllte. Reicht unser Stammbaum unendlich weit zurück? Oder enden seine Wurzeln irgendwo? Ist der Kosmos so vergänglich wie wir selbst?

Schon die alten Griechen debattierten lebhaft über den Ursprung der Zeit. Aristoteles argumentierte gegen einen Urbeginn, denn aus nichts entstehe nur wieder nichts. Wenn das Universum niemals vom Nichtsein zum Sein habe übergehen können, müsse es immer existiert haben. Darum erstrecke sich die Zeit unbegrenzt in Zukunft und Vergangenheit. ▷



ALFRED T. KAMAJAN

Begann die kosmische Uhr im Moment des Urknalls zu ticken – oder hat die Zeit weder Anfang noch Ende? Diese zunächst rein philosophische Frage suchen nun Kosmologen zu klären.

▷ Den entgegengesetzten Standpunkt vertraten die christlichen Theologen. Augustinus zufolge existiert Gott jenseits von Raum und Zeit und vermag darum diese Attribute genauso zu erschaffen wie alle anderen Aspekte unserer Welt. Auf die Frage, was Gott tat, bevor er die Welt schuf, gab Augustinus zur Antwort: Da die Zeit selbst Teil der göttlichen Schöpfung ist, gab es kein Vorher.

Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie führte praktisch zum selben Schluss. In dieser Theorie sind Raum und Zeit gleichsam weich und verformbar. Im Großen verhält sich der Raum selbst dynamisch: Indem er mit der Zeit expandiert oder schrumpft, bewegt er die Materie wie Treibgut bei Ebbe und Flut.

In den 1920er Jahren entdeckten die Astronomen, dass unser Universum gegenwärtig expandiert: Ferne Galaxien bewegen sich voneinander fort. Wie die Physiker Stephen Hawking und Roger Penrose in den 1960er Jahren bewiesen, kann sich deshalb die Zeit nicht unbegrenzt in die Vergangenheit erstrecken. Spult man nämlich die Geschichte des Kosmos rückwärts ab, so vereinigen sich schließlich alle Galaxien in einer punktförmigen Singularität – fast so, als würden sie von einem Schwarzen Loch verschlungen. Jede Galaxie oder ihr urtümlicher Vorläufer wird auf die Größe null zusammengepresst, während Dichte, Temperatur und Raumzeitkrümmung ins Unendliche wachsen. Die Singularität ist der absolute Endpunkt unserer kosmischen Ahnenreihe.

Die unvermeidliche Singularität stellt die Kosmologen vor ernste Probleme. Insbesondere verträgt sie sich schlecht mit dem hohen Maß an Homogenität und Isotropie, welches das Universum im Großen aufweist. Damit der Kosmos mehr oder weniger überall gleich aussehen kann, muss es zwischen weit entfernten Raumregionen irgendeine Art von Kommunikation zur Abstimmung ihrer Eigenschaften gegeben haben. Doch das steht im Widerspruch zur ursprünglichen Version des kosmologischen Standardmodells.

Die Homogenität war kein Zufall

Betrachten wir, was in den 13,7 Milliarden Jahren seit der Freisetzung der kosmischen Hintergrundstrahlung geschehen ist. Der Abstand zwischen den Galaxien nahm durch die Expansion auf das Tausendfache zu, während der Radius des beobachtbaren Universums um den viel größeren Faktor hunderttausend anwuchs, weil das Licht die Expansion überholte. Wir sehen heute Bereiche des Universums, die wir vor 13,7 Milliarden Jahren nicht hätten sehen können. Tatsächlich erreicht zum ersten Mal in der kosmischen Geschichte das Licht der fernsten Galaxien unsere Milchstraße.

Dennoch stimmen die Eigenschaften der Milchstraße im Wesentlichen mit denen der fernsten Galaxien überein. Es ist, als ginge man zu einer Party und stellte dort verblüfft fest, dass alle Gäste genau die gleiche Kleidung tragen. Wären nur zwei gleich angezogen, könnte man dies als Zufall abtun, aber so muss man annehmen, die Gäste hätten sich vorher abgesprochen. In der Kosmologie geht es nicht nur um ein Dutzend, sondern um Zehntausende – so groß ist bei der kosmischen Hintergrundstrahlung die Anzahl unabhängiger und doch statistisch gleichartiger Himmelsabschnitte.

Im Prinzip wäre denkbar, dass jedes dieser separaten Gebiete von Anfang an exakt gleiche Eigenschaften bekam; dann wäre die Homogenität purer Zufall. Die Physiker bevorzugen jedoch zwei plausiblere Erklärungen: Das frühe Universum war viel kleiner oder viel älter als im Standardmodell. In beiden Fällen wäre eine Kommunikation zwischen entfernten Regionen möglich.

Heute ist besonders die erste Lösung populär. Demnach durchlief unser Universum in seiner Frühzeit eine Phase beschleunigter Expansion, die so genannte Inflation. Vorher war der Kosmos erheblich kleiner als im Modell, und heute weit entfernte Regionen des Raumes konnten damals ihre Eigenschaften angleichen. Erst während der Inflation riss dieser Kontakt ab, weil das Licht nicht mit dem extremen Expansionstempo Schritt halten konnte. Nach dem Ende der Inflation verlangsamte sich die Expansion und die Galaxien bekamen einander nach und nach wieder zu Gesicht.

Die Physiker postulieren als Ursache der Inflation die potenzielle Energie eines neuartigen Quantenfelds namens Inflaton, das 10^{-35} Sekunden nach dem Urknall seine Wirkung entfaltete. Diese potenzielle Energie führte – anders als Ruhemasse oder kinetische Energie – zu einer gravitativen Abstoßung. Während die Schwerkraft normaler Materie die Expansion bremst, wirkte das Inflaton beschleunigend. Das erstmals 1981 vorgeschlagene Inflationsszenario vermag eine Vielzahl von Beobachtungen präzise zu erklären. Dennoch bleiben theoretische Probleme – so die Frage, was das Inflaton eigentlich ist und woher seine gewaltige potenzielle Energie stammt (siehe »Ein Universum voll dunkler Rätsel« von Gerhard Börner, Spektrum der Wissenschaft 12/2003, S. 28).

Eine andere, weniger bekannte Lösung des kosmologischen Rätsels folgt der zweiten Alternative, indem sie die Singularität abschafft. Wenn die Zeit nicht erst mit dem Urknall anfing, sondern schon lange vor Beginn der Expansion, dann hätte die Materie viel Zeit gehabt, sich gleichförmig zu arrangieren. Darum haben einige Forscher die Argumente, aus denen die Notwendigkeit einer Singularität hervorgeht, kritisch unter die Lupe genommen.

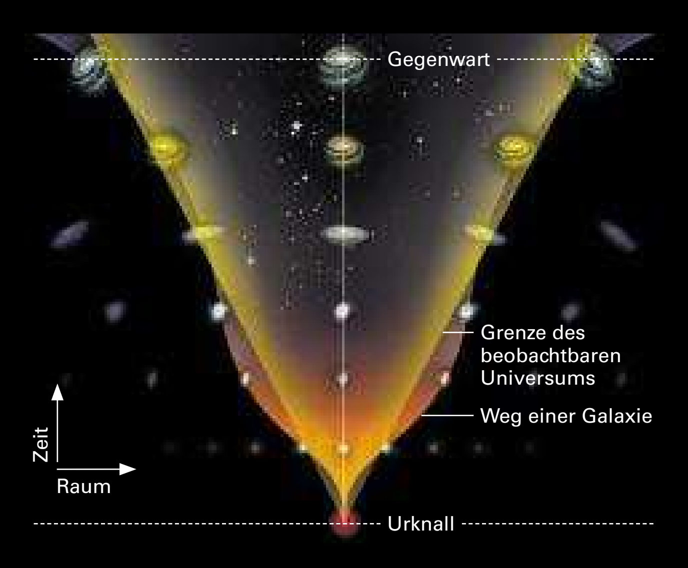
Fragwürdig ist schon die Voraussetzung, die Relativitätstheorie gelte unein-

IN KÜRZE

- Seit jeher diskutieren Philosophen, Theologen und Wissenschaftler, ob die Zeit ewig oder endlich ist. Nach **Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie** ist die Zeit endlich: Das Universum hat mit dem Urknall angefangen zu existieren.
- Doch in der Nähe des Urknalls kommen **Quanteneffekte** ins Spiel und die Allgemeine Relativitätstheorie verliert ihre Gültigkeit. Ein Favorit für eine vollständige Quantentheorie der Gravitation ist die Stringtheorie. Sie postuliert als neue Naturkonstante ein minimales Quantum der Länge. Damit wird die Entstehung des Kosmos aus der Urknall-Singularität unmöglich.
- Gemäß den **Symmetrien der Stringtheorie** hat die Zeit weder Anfang noch Ende. Der Urknall hat zwar trotzdem stattgefunden, aber nicht als singulärer Moment unendlicher Dichte. Das Universum könnte anfangs fast leer gewesen sein und sich allmählich bis zum Urknall verdichtet haben – oder es könnte einen Zyklus von Entstehen und Vergehen durchlaufen. In jedem Fall hat die Zeit vor dem Urknall den gegenwärtigen Kosmos mitgeformt.

Zwei Versionen des Anfangs

In unserem expandierenden Universum streben die Galaxien auseinander. Die Geschwindigkeit, mit der sich zwei Galaxien voneinander entfernen, ist proportional zu ihrem Abstand: Ein um 500 Millionen Lichtjahre getrenntes Paar entfernt sich doppelt so schnell voneinander wie eines mit 250 Millionen Lichtjahren Abstand. Darum müssen alle Galaxien einmal zur selben Zeit am selben Ort gewesen sein. Seither hat es Phasen beschleunigter und verlangsamter Expansion gegeben. In den Raum-Zeit-Diagrammen (unten) folgen die Galaxien darum Kurven, die sie manchmal aus dem beobachtbaren Raumgebiet (gelber Keil) heraus- und wieder hineinführen. Am Anfang dieser Bewegung – dem Urknall – bricht die herkömmliche Physik zusammen.



Nach der klassischen Urknall-Kosmologie, die auf Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie beruht, betrug der Abstand zweier beliebiger Galaxien vor endlich langer Zeit exakt null. Vor diesem Zeitpunkt verlieren die Begriffe Raum und Zeit jede Bedeutung.



In modernen Modellen verbieten Quanteneffekte, dass die Galaxien auf einen infinitesimalen Punkt komprimiert werden; der Abstand kann eine minimale Distanz nicht unterschreiten. Solche Modelle lassen die Existenz eines Universums vor dem Urknall zu.

geschränkt. In nächster Nähe der mutmaßlichen Singularität müssen Quanteneffekte eine dominante Rolle gespielt haben, doch die Allgemeine Relativitätstheorie kennt solche Effekte nicht. An die Unvermeidlichkeit der Singularität zu glauben bedeutet also, dieser Theorie übermäßig zu vertrauen. Um zu wissen, was beim Urknall wirklich geschah, müssen die Physiker erst eine Quantentheorie der Gravitation entwickeln. Seit Einstein haben sich Theoretiker darum bemüht, bis Mitte der 1980er Jahre jedoch praktisch ohne Erfolg.

Derzeit versprechen vor allem zwei Ansätze Erfolg. Der eine heißt Loop-Quantengravitation; er behält Einsteins Theorie im Wesentlichen bei, führt aber Quanten von Raum und Zeit ein (siehe »Quanten der Raumzeit« von Lee Smolin, Spektrum der Wissenschaft 3/2004, S. 54). Die Anhänger dieser Theorie haben in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt und tiefe Einsichten gewonnen.

Schleifen oder Fäden?

Trotzdem ist ihr Ansatz vielleicht nicht radikal genug. Mit einem ähnlichen Problem sahen sich die Teilchenphysiker konfrontiert, nachdem Enrico Fermi 1934 seine Theorie der schwachen Kernkraft aufgestellt hatte: Alle Anstrengungen, eine Quantenversion von Fermis Theorie zu schaffen, schlugen fehl. Offenbar war nicht bloß ein neues Rechenverfahren nötig, sondern eine grundlegende Neuerung, welche erst die Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung von Sheldon L. Glashow, Steven Weinberg und Abdus Salam in den späten 1960er Jahren mit sich brachte.

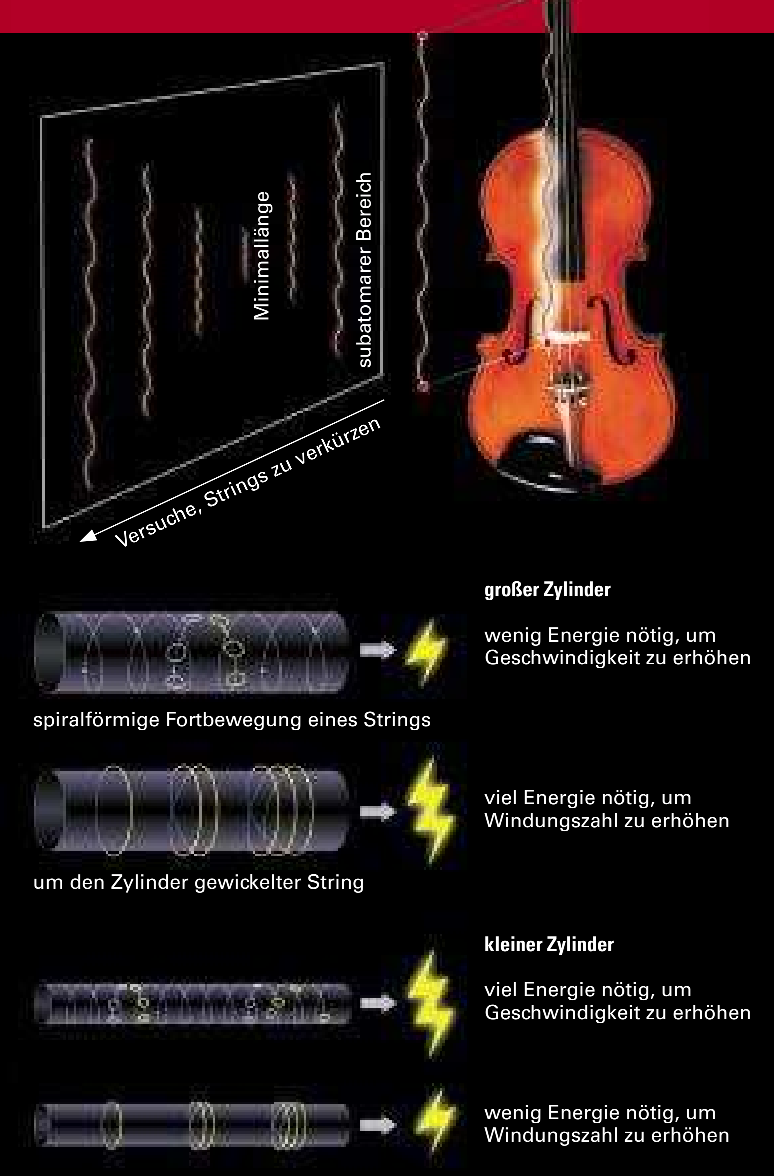
Der zweite Ansatz, den ich persönlich für eine wirklich revolutionäre Modifikation der Einstein'schen Theorie halte, ist die Stringtheorie. Auf sie konzentriert sich dieser Artikel, obwohl Befürworter der Loop-Quantengravitation behaupten, sie könnten mit ihrem Modell zu ganz ähnlichen Schlussfolgerungen gelangen.

Die Stringtheorie erwuchs aus einem Modell, das ich bereits 1968 aufstellte, um Kernteilchen wie Proton und Neutron und deren Wechselwirkungen zu beschreiben. Trotz anfänglicher Begeisterung scheiterte das Modell. Es wurde einige Jahre später zu Gunsten der Quantenchromodynamik aufgegeben, welche die Kernteilchen mit Hilfe noch fundamentalerer Bausteine beschreibt. Diese so genannten Quarks sind innerhalb eines Protons oder Neutrons eingesperrt, als seien sie durch elastische Fäden aneinander gefesselt. Im Rückblick zeigt sich, dass die ursprüngliche Stringtheorie ▷

Kleiner Kurs in Stringtheorie

Die Stringtheorie ist die führende – wenn auch nicht einzige – Theorie, die zu beschreiben versucht, was im Augenblick des Urknalls geschah. Strings sind subatomare Fäden, die wie Violinsaiten schwingen. Wenn ein Geiger einen Finger auf dem Griffbrett zu sich schiebt, verkürzt er die Saite und erhöht dadurch nach Belieben die Frequenz – und Energie – der Schwingungen. Im subatomaren Bereich kommen jedoch Quanteneffekte ins Spiel und definieren eine Minimallänge für Strings.

Ein String kann sich nicht nur als Ganzes fortbewegen oder wie eine Saite schwingen, sondern sich auch wie eine Sprungfeder einrollen. Stellen wir uns einen zylindrischen Raum vor, dessen Umfang größer ist als die zulässige Minimallänge des Strings. Dann ist für jede Erhöhung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit wenig Energiezufuhr nötig, während jede zusätzliche Windung viel Energie verschlingt. Ist der Zylinderumfang hingegen kleiner als die Minimallänge, gilt das Umgekehrte: Eine Extrawindung kostet weniger Energie als die schnellere Fortbewegung. Letztlich kommt es aber nur auf die Gesamtenergie an, und sie ist vom Zylinderumfang unabhängig. In jedem Fall schrumpft der String nicht unter die Minimallänge. Dies verhindert, dass die Materie beim Urknall unendlich verdichtet wird.



SAMUEL VELASCO

▷ (*string* englisch für Faden) diesen Aspekt der nuklearen Welt erfasst hatte. Doch erst später wurde sie als Kandidat für die Vereinigung von Relativitäts- und Quantentheorie wieder hervorgeholt.

Die Grundidee besagt, dass die fundamentalsten Teilchen nicht punktförmige Gebilde sind: Der große Zoo der Elementarteilchen, jedes mit all seinen typischen Eigenschaften, geht aus den vielen möglichen Schwingungszuständen unendlich dünner, eindimensionaler Fäden oder Strings hervor. Wie kann eine so simple Theorie die komplizierte Welt der Teilchen und ihrer Wechselwirkungen beschreiben?

Die Antwort liegt in einer Art Quanten-String-Zauberei. Werden die Regeln der Quantenmechanik auf einen vibrierenden String angewendet – der einer winzigen Violinsaite gleicht, nur breiten sich die Schwingungen darauf mit Lichtgeschwindigkeit aus –, so tauchen neue Eigenschaften auf. Diese haben grundlegende Bedeutung für Teilchenphysik und Kosmologie.

Erstens haben Strings eine endliche Länge. Gäbe es keine Quanteneffekte, so könnte man eine Geigensaite immer weiter halbieren, bis schließlich ein punktförmiges, masseloses Teilchen übrig bliebe. Doch die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation verhindert, dass Strings kürzer werden als 10^{-34} Meter. Dieses irreduzible Längenquant, die String-Länge l_s, ist eine neue Naturkonstante, welche durch die Theorie zur Lichtgeschwindigkeit c und dem Planck'schen Wirkungsquantum h hinzukommt. Diese Konstante spielt eine entscheidende Rolle bei fast jedem Aspekt der Stringtheorie, indem sie Größen auf endliche Werte beschränkt, die sonst entweder null oder unendlich würden.

Zweitens können selbst masselose Strings einen Drehimpuls haben. In der klassischen Physik ist der Drehimpuls eine Eigenschaft eines Objekts, das um eine Achse rotiert. In der Formel für den Drehimpuls werden Geschwindigkeit, Masse und Abstand von der Achse miteinander multipliziert; folglich kann ein masseloses Objekt keinen Drehimpuls besitzen. Doch in der Stringtheorie machen sich Quantenfluktuationen bemerkbar. Ein masseloser String kann deshalb bis zu zwei Einheiten von h an

Drehimpuls aufnehmen. Diese Eigenschaft ist den Physikern sehr willkommen, denn sie passt zu den Trägern aller bekannten Wechselwirkungen – etwa zum Photon für den Elektromagnetismus und zum Graviton für die Schwerkraft. Historisch gesehen war es der Drehimpuls, der den Physikern die Bedeutung der Stringtheorie für die Quantengravitation aufzeigte.

Drittens erfordern Strings die Existenz von zusätzlichen Raumdimensionen zu den üblichen drei. Während eine klassische Violinsaite unabhängig von den Eigenschaften von Raum und Zeit schwingt, ist ein String wählerischer: Seine Schwingungsgleichungen gelten nur, wenn die Raumzeit entweder – im Widerspruch zu den Beobachtungen – stark gekrümmt ist oder sechs zusätzliche Raumdimensionen enthält.

Viertens haben physikalische Größen wie die Gravitations- oder die Dielektrizitätskonstante, die in den physikalischen Gleichungen auftreten und die Eigenschaften der Natur festlegen, nicht mehr beliebige feste Werte. In der Stringtheorie erscheinen sie als Felder, die, ähnlich dem elektromagnetischen Feld, ihre Werte dynamisch verändern können. Diese Felder können in verschiedenen kosmologischen Epochen oder in weit entfernten Raumregionen unterschiedliche Werte annehmen. Sogar heute könnten die vermeintlichen physikalischen Konstanten winzige Abweichungen zeigen. Die Beobachtung solcher Schwankungen würde der Stringtheorie enormen Auftrieb verleihen.

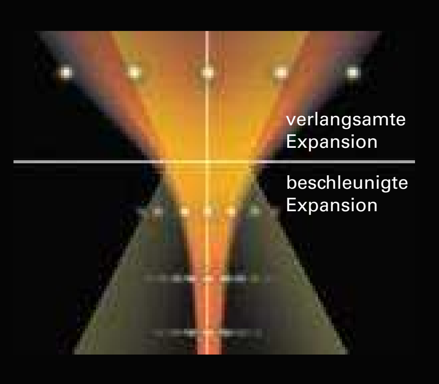
Raumzeit mit elf Dimensionen

Eines dieser Felder, das so genannte Dilaton, ist der Hauptschlüssel zur Stringtheorie: Es bestimmt die Stärke sämtlicher Wechselwirkungen. Das Dilaton fasziniert die Stringtheoretiker, weil sein Wert als Größe einer zusätzlichen Raumdimension interpretiert werden kann; dadurch erhält die Raumzeit insgesamt elf Dimensionen.

Außerdem haben die Strings den Physikern ganz neuartige Natursymmetrien beschert. Diese so genannten Dualitäten werfen unsere Vorstellung von extrem kleinen Objekten völlig um. Eine Dualität habe ich bereits erwähnt: Normalerweise ist ein kurzer String leichter als ein langer – doch wenn wir versuchen, ihn unter die fundamentale Größe l_s zu verkürzen, wird er wieder schwerer. ▷

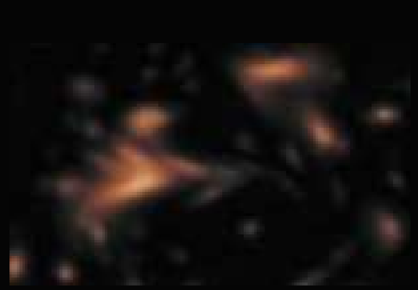
Das Prä-Urknall-Szenario

Ein erster Versuch, die Stringtheorie auf die Kosmologie anzuwenden, war das Prä-Urknall-Szenario. Demnach ist der Urknall nicht der ultimative Beginn des Universums, sondern nur eine Durchgangsphase. Davor beschleunigte sich die Expansion, während sie sich danach – zumindest anfangs – verlangsamte. Der Weg der Galaxien durch die Raumzeit ist geformt wie ein Cocktailglas (rechts).





Das Universum existiert ewig. In ferner Vergangenheit war es fast leer. Alle Naturkräfte – insbesondere die Gravitation – waren damals viel schwächer als heute.

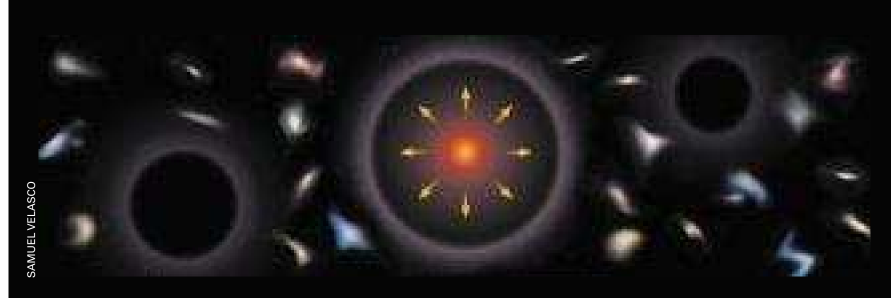


Die Kräfte wurden allmählich stärker und die Materie klumpte sich zusammen. In einigen Regionen stieg die Dichte so sehr an, dass ein Schwarzes Loch entstand.



Der Raum innerhalb des Lochs expandierte beschleunigt. Die Materie im Innern wurde von der Außenwelt abgeschnitten.

Im Loch stürzte die Materie zum Zentrum und wurde komprimiert, bis ihre Dichte die von der Stringtheorie gesetzte Grenze erreichte.



SAMUEL VELASCO

Als die Materie die größtmögliche Dichte erreichte, kam es auf Grund von Quanteneffekten zu einem Urknall. Außerhalb begannen sich andere Schwarze Löcher zu bilden – jedes ein eigenes Universum.

▷ Eine andere Symmetrie ist die T-Dualität; sie besagt, dass kleine und große Extradimensionen einander äquivalent sind. Diese Symmetrie entsteht, weil Strings sich auf kompliziertere Weise bewegen können als punktförmige Teilchen. Betrachten wir einen geschlossenen String; diese Schleife liegt auf einem zylindrischen Raum, dessen kreisförmiger Querschnitt eine endliche Extradimension darstellt. Der String kann nicht nur vibrieren, sondern auch als Ganzes um den Zylinder wandern oder sich einmal oder mehrmals um ihn herumwinden wie ein Gummiband, das um eingerolltes Papier gewickelt wird (siehe Bild S. 34).

Der Energieaufwand für diese zusätzlichen Stringzustände hängt von der Größe des Zylinders ab. Die Energie für das Herumwinden ist direkt proportional zum Zylinderradius: Ist der Zylinder dicker, muss sich der String beim Herumwickeln mehr dehnen, und deshalb enthalten die Windungen mehr Energie als bei einem dünneren Zylinder. Die Energie für Bewegungen um den Zylinderumfang ist hingegen umgekehrt proportional zum Radius: Größere Zylinder erlauben größere Wellenlängen, die weniger Energie repräsentieren als kleine Wellenlängen. Wechselt man nun einen dicken gegen einen dünnen Zylinder aus, so können die beiden Bewegungszustände ihre Rollen vertauschen: Energien, die zuvor durch kreisförmige Bewegungen produziert wurden, werden nun durch Aufwickeln erzeugt und umgekehrt. Ein äußerer Beobachter bemerkt nur die Energieniveaus, nicht deren Ursachen. Deshalb sind für ihn große und kleine Zylinderradien physikalisch äquivalent.

Strings mit losen Enden

Zwar wird die T-Dualität üblicherweise anhand von zylinderförmigen Räumen beschrieben, bei denen eine Dimension – der Umfang – endlich ist, doch eine Variante bezieht sich auf unsere gewöhnlichen drei Dimensionen, die sich anscheinend unendlich weit erstrecken. Spricht man von der Expansion eines unendlichen Raumes, ist Vorsicht geboten: Seine Gesamtgröße kann sich nicht ändern; sie ist und bleibt unendlich. Dennoch expandiert der Raum in dem Sinn, dass in den Raum eingebettete Objekte, etwa Galaxien, sich voneinander entfernen. Die entscheidende Variable ist nicht die Größe des gesamten Raumes, sondern sein Skalenfaktor – das heißt der Faktor, um den der Abstand zwischen den Galaxien wächst; ihn messen die Astronomen mittels der galaktischen Rotverschiebung. Der T-Dualität zufolge sind Universen mit kleinem Skalenfaktor äquivalent zu solchen mit großem. In den Einstein'schen Gleichungen gibt es keine derartige Symmetrie; sie entsteht erst aus der Vereinheitlichung der Naturkräfte im Rahmen der Stringtheorie, wobei das Dilaton die zentrale Rolle spielt.

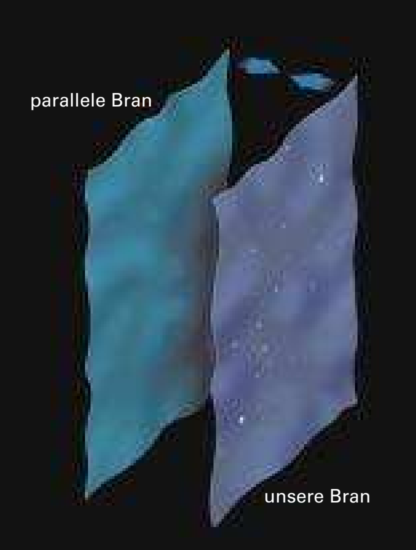
Jahrelang glaubten die Stringtheoretiker, die T-Dualität gelte nur für geschlossene Strings und nicht für offene, weil deren lose Enden sich nicht aufwickeln könnten. Doch 1995 erkannte Joseph Polchinski an der Universität von Kalifornien in Santa Barbara, dass die T-Dualität sich sehr wohl auf offene Strings anwenden lässt, sofern das Vertauschen zwischen großen und kleinen Zylinderradien mit einem Wechsel der Bedingungen an den Enden der Strings einhergeht. Zuvor hatten die Physiker Randbedingungen postuliert, bei denen keine Kraft auf die String-Enden wirkt und diese lose umherflattern können. Im Rahmen der T-Dualität gelten jedoch die so genannten Dirichlet-Randbedingungen, welche die Enden fixieren.

Bei jedem String können beide Arten von Randbedingungen gemischt auftreten. Zum Beispiel können Elektronen Strings sein, deren Enden sich in drei Raumdimensionen frei bewegen, aber in den übrigen sieben festsitzen. Die drei Dimensionen bilden einen Unterraum,

Das ekpyrotische Szenario

Wenn unser Universum eine mehrdimensionale Membran oder »Bran« ist, die durch einen höherdimensionalen Raum treibt, könnte der Urknall die Kollision unserer Bran mit einer anderen gewesen sein. Solche Zusammenstöße könnten zyklisch wiederkehren. Der Weg jeder Galaxie durch die Raumzeit gleicht einem Stundenglas (unten).





Zwei fast leere Branen ziehen einander an. Während der Annäherung zieht sich jede rechtwinklig zur Bewegungsrichtung zusammen.



Die Branen kollidieren; ihre Bewegungsenergie verwandelt sich dabei in Strahlung und Materie. Dieser Zusammenstoß ist der Urknall.

der Dirichlet-Membran oder kurz D-Bran heißt. 1996 vermuteten Petr Horava an der Universität von Kalifornien in Berkeley und Edward Witten vom Institute for Advanced Study in Princeton, unser Universum residiere in einer solchen Membran. Die eingeschränkte Beweglichkeit der Elektronen und anderer Teilchen erklärt somit, warum wir nicht alle zehn Raumdimensionen wahrzunehmen vermögen.

All die magischen Eigenschaften der Strings weisen in eine bestimmte Richtung: Strings verabscheuen Unendlichkeit. Sie können nicht zu einem infinitesimalen Punkt kollabieren, und so vermeiden sie die damit verbundenen Paradoxien. Ihre endliche Länge und die neuartigen Symmetrien definieren obere beziehungsweise untere Grenzen für physikalische Größen, die in herkömmlichen Theorien gegen unendlich oder gegen null streben.

Geht man in der Geschichte des Universums immer weiter zurück, so nimmt die Krümmung der Raumzeit immer mehr zu. Doch gemäß der Stringtheorie wird die Krümmung nie unendlich groß wie bei der traditionellen Urknall-Singularität, sondern erreicht schließlich ein Maximum und sinkt wieder ab. Bevor es die Stringtheorie gab, konnten die Physiker sich keinen Mechanismus vorstellen, der die Singularität so glatt eliminiert.

In der Nähe des Urknalls herrschten so extreme Bedingungen, dass noch niemand die Gleichungen zu lösen weiß. Dennoch wagen die Stringtheoretiker Hypothesen über das Universum vor dem Urknall. Derzeit sind zwei Modelle im Gespräch.

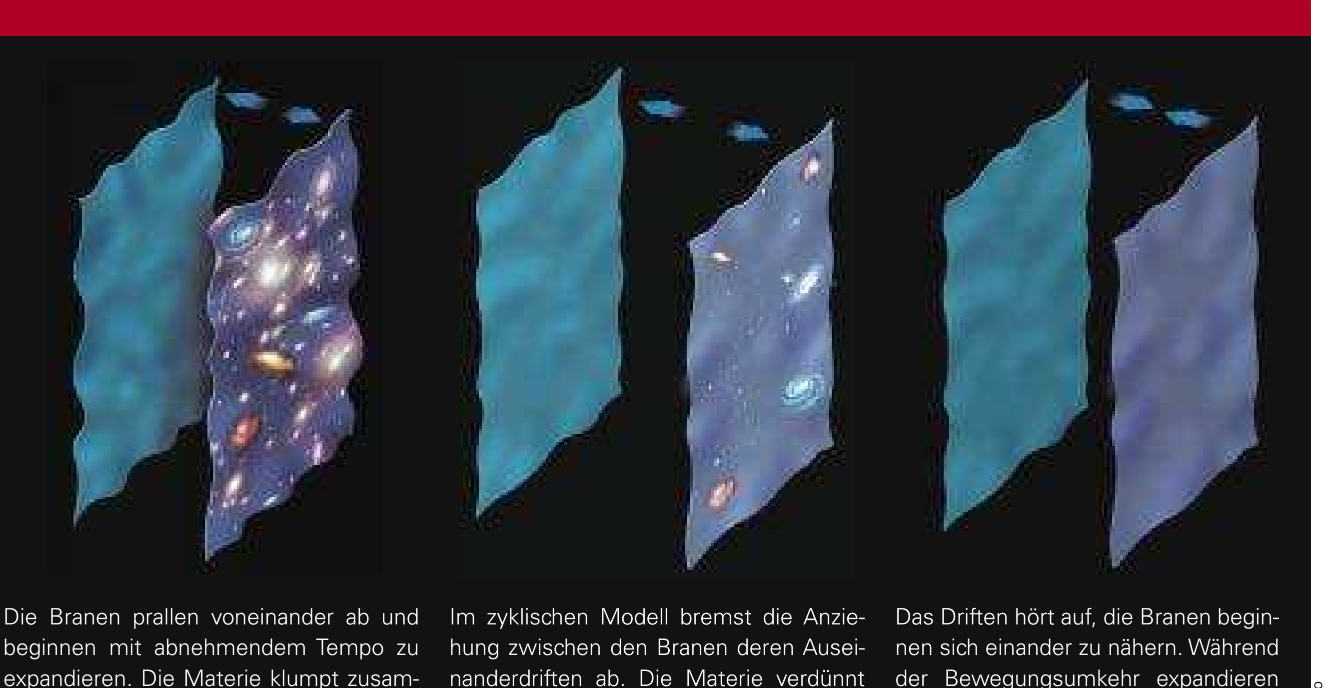
Das erste heißt Prä-Urknall-Szenario und wurde von meinen Kollegen und mir 1991 entwickelt. Es kombiniert die T-Dualität mit der besser bekannten Symmetrie der Zeit-Umkehr; sie besagt, dass die physikalischen Gleichungen unabhängig davon, ob die Zeit vorwärts oder rückwärts abläuft, genau gleich funktionieren. Die Kombination ermöglicht neue Kosmologien, bei denen das Universum beispielsweise fünf Sekunden vor dem Urknall gleich schnell expandierte wie fünf Sekunden danach. Allerdings änderte sich die Expansionsgeschwindigkeit in den beiden Augenblicken in entgegengesetzter Weise: Wenn sie sich nach dem Urknall verlangsamte, so beschleunigte sie sich davor. Demnach war der Urknall nicht der Beginn des Universums, sondern bloß ein heftiger Übergang von Beschleunigung zu Verlangsamung.

Das Schöne an diesem Bild ist, dass es automatisch die große Erkenntnis der üblichen Inflationstheorie enthält: Unser Universum musste eine Phase beschleunigter Expansion durchlaufen, um derart homogen und isotrop zu werden. In der Standardtheorie geschieht die Beschleunigung nach dem Urknall infolge eines ad hoc angenommenen Inflaton-Feldes. Im Prä-Urknall-Szenario geschieht sie vor dem Urknall – als natürliche Konsequenz der neuen String-Symmetrien.

Ein Spiegel der Post-Urknalls

Nach diesem Szenario war das Prä-Urknall-Universum ein fast perfektes Spiegelbild des Post-Urknall-Universums (siehe Bild S. 35). Wenn das Universum bis in alle Ewigkeit existiert und sich sein Inhalt dabei langsam immer weiter verdünnt, dann existiert es demnach auch seit Ewigkeiten. Vor unendlich langer Zeit war es fast leer, nur von einem dünnen chaotischen Gas aus Strahlung und Materie durchzogen. Die vom Dilaton-Feld kontrollierten Naturkräfte waren so schwach, dass die Gaspartikel kaum in Wechselwirkung traten.

Mit der Zeit wurden die Kräfte stärker und zogen Materie zusammen. Einige Regionen sammelten zufällig mehr Materie als ihre Umgebung. Schließlich wuchs in diesen Regionen die Dichte so stark an, dass sich Schwarze Löcher bildeten. Dadurch wurde die Materie in ▷



Die Branen prallen voneinander ab und beginnen mit abnehmendem Tempo zu expandieren. Die Materie klumpt zusammen; Galaxienhaufen entstehen.

Im zyklischen Modell bremst die Anziehung zwischen den Branen deren Auseinanderdriften ab. Die Materie verdünnt sich immer mehr.

Das Driften hört auf, die Branen beginnen sich einander zu nähern. Während der Bewegungsumkehr expandieren beide beschleunigt.

SAMUEL VELASCO

▷ diesen Gebieten vom Rest des Universums abgeschnitten, und es zerfiel in unzusammenhängende Stücke.

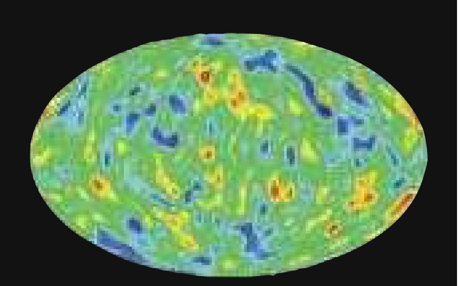
Innerhalb eines Schwarzen Lochs vertauschen Raum und Zeit ihre Rollen. Das Zentrum des Schwarzen Lochs ist kein Punkt im Raum, sondern ein Zeitpunkt. Während die einfallende Materie sich dem Zentrum näherte, stieg ihre Dichte immer weiter an. Doch sobald Dichte, Temperatur und Krümmung den von der Stringtheorie erlaubten Maximalwert erreichten, kehrte sich die Entwicklung um, und die Größen nahmen ab. Diesen Umkehrmoment nennen wir Urknall. Aus dem Innern eines dieser Schwarzen Löcher wurde unser Universum.

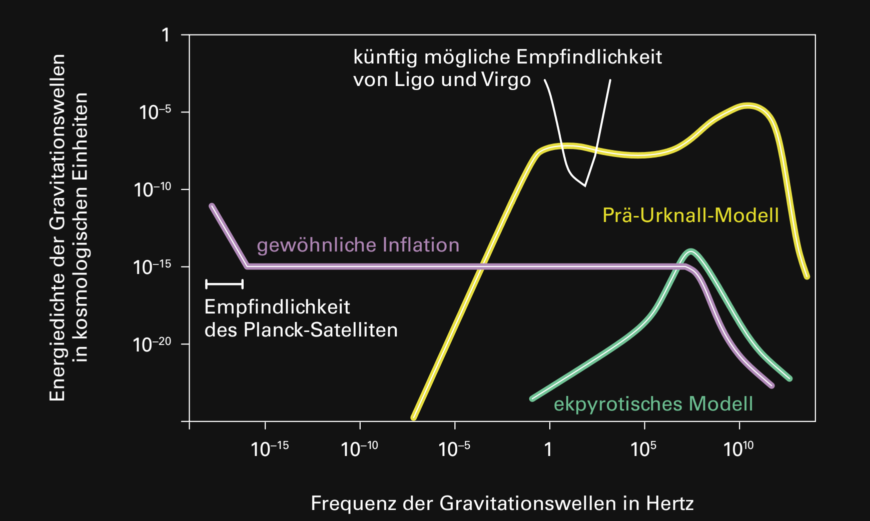
Kein Wunder, dass ein derart unkonventionelles Szenario für Kontroversen sorgt. Andrei Linde von der Stanford-Universität meint, das Schwarze Loch, aus dem unser Kosmos hervorging, müsse ungewöhnlich groß gewesen sein – viel größer als die Längenskala der Stringtheorie. Darauf lässt sich erwidern, dass die Gleichungen Schwarze Löcher in allen möglichen Größen zulassen. Unser Universum hat sich eben zufällig in einem genügend großen Schwarzen Loch gebildet.

Ein heiklerer Einwand wurde von Thibault Damour am Institut des Hautes Études Scientifiques in Bures-sur-Yvette (Frankreich) und Marc Henneaux an der Freien Universität Brüssel erhoben: Materie und Raumzeit hätten sich nahe dem Urknall chaotisch verhalten, und das widerspreche der beobachteten Gleichmäßigkeit des frühen Universums. Als Antwort habe ich kürzlich vorgeschlagen, dass der chaotische Zustand ein dichtes Gas von winzigen und massereichen »String-Löchern« erzeugte – das heißt Strings, die knapp davor standen, zu Schwarzen Löchern zu werden. Das Verhalten dieser Löcher könnte das von Damour und Henneaux aufgeworfene Problem lösen. Einen ähnlichen Vorschlag haben Thomas Banks von der Rutgers-Universität und Willy Fischler von der Universität von Texas in Austin gemacht. Es gibt weitere Kritikpunkte – aber ob sie tatsächlich einen fundamentalen Fehler im Prä-Urknall-Szenario aufzeigen, muss sich erst erweisen.

Verräterische Spuren der Zeit vor dem Urknall

Wie wollen Forscher das Universum vor dem Urknall beobachten? Nur eine Form von Strahlung kann von damals zurückgeblieben sein – Gravitationswellen. Diese periodischen Schwankungen des Gravitationsfeldes machen sich entweder indirekt durch eine Polarisation der kosmischen Hintergrundstrahlung bemerkbar (rechts) oder direkt als Gravitationswellen. Das Prä-Urknall- und das ekpyrotische Szenario sagen mehr hochfrequente und weniger niederfrequente Gravitationswellen voraus als die herkömmlichen Inflationsmodelle (unten). Gegenwärtige astronomische Messungen vermögen nicht zwischen diesen Modellen zu unterscheiden, aber künftige Beobachtungen mit dem Planck-Satelliten sowie mit den irdischen Gravitationswellen-Detektoren Ligo und Virgo werden dazu wohl fähig sein.





NASA (OBEN); GABRIELE VENEZIANO, CERN (UNTEN)

Wenn Membranen kollidieren

Das zweite wichtige Modell eines Universums vor dem Urknall ist das ekpyrotische Szenario (von Ekpyrose, einem Begriff der antiken Stoiker für griechisch »[Entstehung] aus Feuer«). Es wurde 2001 von einem Team aus Kosmologen und Stringtheoretikern entwickelt: Justin Khoury von der Columbia-Universität, Paul J. Steinhardt von der Princeton-Universität, Burt A. Ovrut von der Universität von Pennsylvania, Nathan Seiberg vom Institute for Advanced Study sowie Neil Turok von der Universität Cambridge. Das ekpyrotische Modell beruht auf der Idee, dass unser Universum nur eine von vielen D-Branen ist, die in einem höherdimensionalen Raum treiben (siehe Spektrum der Wissenschaft 8/2001, S. 12). Die Branen ziehen einander an und kollidieren gelegentlich. Der Urknall ist demnach als Kollision einer anderen Bran mit unserer eigenen zu erklären (siehe Kasten S. 36/37).

In einer Variante dieses Szenarios wiederholen sich die Kollisionen zyklisch: Zwei Branen stoßen zusammen, prallen voneinander ab, trennen sich, ziehen sich an, kollidieren erneut und so weiter. Zwischen den Kollisionen verhalten sich die Branen wie elastisches Material: Sie expandieren während der Trennungsphase und ziehen sich bei Annäherung zusammen. Während der Bewegungsumkehr beschleunigt sich die Expansion; die gegenwärtig beschleunigte Expansion des Kosmos könnte somit anzeigen, dass eine weitere Kollision bevorsteht.

Das Prä-Urknall-Szenario und das ekpyrotische Modell weisen einige Gemeinsamkeiten auf. Beide beginnen mit einem großen, kalten und fast leeren Universum, und beide leiden an dem schwierigen – und bislang ungelösten – Problem des Übergangs von der Prä- zur Post-Urknall-Phase. Mathematisch liegt

der Hauptunterschied zwischen den Szenarien im Verhalten des Dilaton-Feldes. Im Prä-Urknall-Modell hat das Dilaton anfangs einen niedrigen Wert – wodurch die Naturkräfte schwach sind – und wird allmählich stärker. Im ekpyrotischen Szenario ist es umgekehrt: Hier kommt es zur Kollision, wenn die Kräfte am schwächsten sind.

Die Schöpfer des ekpyrotischen Modells hatten ursprünglich gehofft, wegen der Schwäche der Kräfte würde der Zusammenprall leichter zu analysieren sein. Auf Grund der dennoch enorm starken Raumkrümmung bleibt aber bislang offen, ob das Szenario tatsächlich eine Singularität vermeidet. Außerdem muss das ekpyrotische Szenario sehr spezielle Anfangsbedingungen erfüllen. Zum Beispiel müssen die Branen kurz vor der Kollision fast exakt parallel zueinander sein, damit ein genügend homogener Urknall zu Stande kommt. Die zyklische Version könnte dieses Problem lösen, denn wiederholte Kollisionen würden die Branen passend ausrichten.

Abgesehen von der schwierigen Aufgabe, die beiden Szenarien mathematisch vollständig zu begründen, müssen die Physiker sich fragen, ob die Modelle überhaupt beobachtbare Konsequenzen haben. Auf den ersten Blick wirken beide Szenarios eher wie Metaphysik – interessante Ideen, die sich empirisch weder beweisen noch widerlegen lassen. Doch diese Ansicht ist zu pessimistisch. Wie die Inflationsphase könnte auch eine Epoche vor dem Urknall winzige Spuren am Himmel hinterlassen, insbesondere in den kleinen Unregelmäßigkeiten, die in der Temperatur des kosmischen Strahlungshintergrunds zu beobachten sind.

Erstens hat sich gezeigt, dass diese Fluktuationen mehrere hunderttausend Jahre lang durch akustische Wellen geformt wurden (siehe »Die Symphonie der Schöpfung« von Wayne Hu und Martin White, Spektrum der Wissenschaft 5/2004, S. 48). Die Regelmäßigkeit der Schwankungen bedeutet, dass diese Wellen synchronisiert gewesen sein müssen.

Die Kosmologen warfen im Lauf der Jahre viele kosmologische Modelle über Bord, weil sie diese Tatsache nicht zu reproduzieren vermochten. Doch das Inflations-, das Prä-Urknall- und das ekpyrotische Szenario bestehen den Test. In allen drei Modellen entstanden die akustischen Wellen aus Quantenprozessen, deren Wirkung während der Phase beschleunigter kosmischer Expansion makroskopisch vergrößert wurde (siehe »Auf der Suche nach dem Quanten-Ursprung der Zeit« von Craig J. Hogan, Spektrum der Wissenschaft 12/2002, S. 28). Darum stimmen die Phasen der Wellen überein.

Test für das Prä-Urknall-Modell

Zweitens sagt jedes Modell eine andere Verteilung der Temperaturschwankungen in Abhängigkeit von deren Winkelgröße voraus. Den Beobachtungen zufolge haben die Fluktuationen in allen Größen ungefähr dieselbe Amplitude. Geringe Abweichungen von dieser Regel treten nur bei sehr kleinen Winkeln auf, weil die primordialen Schwankungen durch spätere Prozesse verändert wurden. Das Inflationsmodell reproduziert diese Verteilung sehr gut. Da sich während der Inflation die Krümmung des Raumes relativ langsam änderte, wurden unterschiedlich große Fluktuationen unter fast gleichen Bedingungen erzeugt.

In den beiden String-Modellen hingegen entwickelte sich die Krümmung schnell und erhöhte dadurch bevorzugt die Amplitude kleinräumiger Fluktuationen. Doch weil andere Prozesse die großräumigen Fluktuationen verstärkten, blieben letztlich wiederum alle Fluktuationen gleich stark. Beim ekpyrotischen Szenario gewährleistet dies die zusätzliche Raumdimension, welche die kollidierenden Branen voneinander trennt. Im Prä-Urknall-Szenario wirkt das Axion – ein mit dem Dilaton verwandtes Quantenfeld – in diesem Sinne ausgleichend. Insofern stimmen alle drei Modelle mit den Daten überein.

Drittens können Temperaturschwankungen zwei unterschiedliche Prozesse im frühen Kosmos widerspiegeln: Fluktuationen in der Materiedichte und Gravitationswellen. Bei der Inflation spielt beides eine Rolle, während beim Prä-Urknall- und beim ekpyrotischen Modell Dichteschwankungen dominieren. Gravitationswellen einer bestimmten Größe würden eine eindeutige Spur in der Polarisation der kosmischen Mikrowellenstrahlung hinterlassen (siehe »Der Nachhall des Urknalls« von Robert R. Caldwell und Marc Kamionkowski, Spektrum der Wissenschaft 4/2001, S. 50). Künftige Beobachtungen, etwa mit dem europäischen Planck-Satelliten, sollten diese Spur nachweisen können, falls es sie gibt.

Ein vierter Test betrifft die Statistik der Fluktuationen. Im Inflationsmodell folgen die Schwankungen einer Glockenkurve oder Gauß-Verteilung. Das Gleiche gilt vermutlich auch im ekpyrotischen Modell, während das Prä-Urknall-Modell deutliche Abweichungen von der Gauß-Kurve zulässt.

Die Analyse der Hintergrundstrahlung ist aber nicht die einzige Möglichkeit, die drei Theorien zu überprüfen. Das Prä-Urknall-Szenario müsste einen zufallsverteilten Hintergrund von Gravitationswellen erzeugen; sie lägen in einem Frequenzbereich, der zwar im Mikrowellen-Hintergrund keine Spuren hinterlässt, aber für künftige Gravitationswellen-Detektoren nachweisbar sein sollte. Zudem variiert im Prä-Urknall- und im ekpyrotischen Szenario das Dilaton-Feld; da es an das elektromagnetische Feld gekoppelt ist, führen beide Modelle zu großräumigen Magnetfeld-Fluktuationen. Spuren davon könnten sich in den galaktischen und intergalaktischen Magnetfeldern nachweisen lassen.

Noch weiß die Wissenschaft keine endgültige Antwort auf die Frage, wann die Zeit begann. Aber immerhin gibt es zwei vielleicht schon bald überprüfbare Theorien, denen zufolge das Universum – und mit ihm die Zeit – schon lange vor dem Urknall existiert hat. Falls eines dieser Szenarien zutrifft, gab es den Kosmos schon immer – und selbst wenn er eines fernen Tages wieder kollabiert, wird er ewig fortbestehen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Gabriele Veneziano ist theoretischer Physiker am europäischen Forschungszentrum Cern. Schon Ende der 1960er Jahre entwickelte er ein Stringmodell für Atomkerne. Als die Stringtheorie in den 1980er Jahren ein Comeback als Theorie der Gravitation erlebte, war Veneziano einer der Ersten, der sie auf Schwarze Löcher und kosmologische Fragen anwandte.

Das elegante Universum. Von Brian Greene. Berliner Taschenbuch Verlag, Berlin 2002

The Pre-Big Bang scenario in string cosmology. Von Maurizio Gasperini und Gabriele Veneziano in: Physics Reports, Bd. 373, S. 1 (2003)

A cyclic model of the universe. Von Paul J. Steinhardt und Neil Turok in: Science, Bd. 296, S. 1436 (2002)

Superstring cosmology. Von James E. Lidsey et al. in: Physics Reports, Bd. 337, S. 343 (2000)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

SPORTKLEIDUNG

Die heimlichen Sieger

»Atmungsaktive« Kleidung erobert immer neue Märkte, im Sport geht längst nichts mehr ohne Polyester.

Von Mark Fischetti

Wenn demnächst Tausende von Zuschauern in der Hitze des griechischen Sommers die olympischen Sportstätten bevölkern, wird sich wohl mancher darunter Funktionskleidung wünschen, wie sie die Athleten tragen. Schweiß verdampft von der Haut und kühlt so den Körper – das ist ein wichtiger Teil der physiologischen Temperaturregulation, doch das Ergebnis ist auch feuchte Kleidung. Die trägt sich unangenehm und erschwert weitere Verdunstung: Die Körpertemperatur steigt. Um dem abzuhelfen, bringen Kleidungshersteller im Sport- und Freizeitsektor »atmungsaktive« Gewebe mit »Feuchtigkeitsmanagement« auf den Markt. Sie sollen den Schweiß vom Körper schnell nach außen führen und abgeben.

Die Hersteller pressen dazu moderne Polyester zu Fasern mit einem äußerst geringen Feuchtigkeitsgehalt, nämlich 0,5 Prozent, im Vergleich zu vier Prozent bei Nylon und sechs bis sieben Prozent bei Baumwolle. Neue Verfahren der Kunststoffverarbeitung ermöglichen es auch, spezielle Querschnitte herzustellen (siehe Abbildung), sodass sich eine Kapillarwirkung ergibt.

Der Markt expandiert und bringt immer neue Produkte hervor. Silberionen in den Fasern sollen durch ihre keimtötende Wirkung Bakterienwachstum und damit Schweißgeruch verhindern, elektrisch leitfähige Zusatzstoffe dafür sorgen, dass die Oberfläche der Kleidung bei den ersten Regentropfen Wasser abstoßend wirkt. Wer immer auf dem neuesten Stand sein will, muss allerdings ordentlich in die Tasche greifen. Doch wie im Automobilmarkt gilt: Was heute Luxus ist, wird in den Folgegenerationen zur Serienausstattung. ◁

Der Autor **Mark Fischetti** ist Redakteur bei »Scientific American«.

Spezielle Polyesterfasern sorgen dafür, dass Funktionskleidung Schweiß aufsaugt und rasch wieder abgibt.

WUSSTEN SIE SCHON?

▶ **Synthetische Fasern** können elektrostatische Ladung häufig nicht abgeben, sodass sie am Körper kleben. Einige Hersteller mischen daher antistatisch wirkende Stoffe bei.

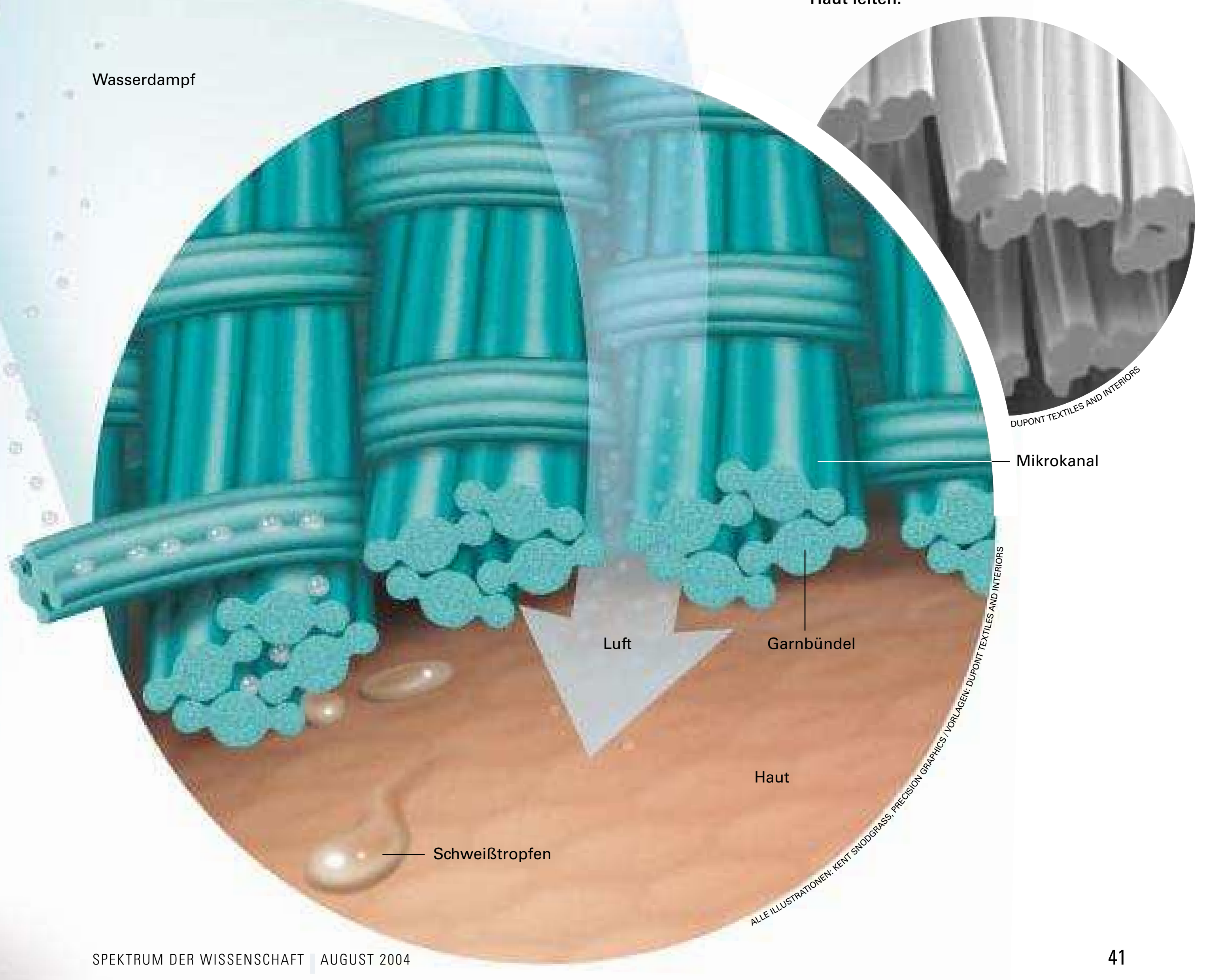
▶ **Zur Erhöhung der Fleckenresistenz**, so behauptete ein Textilhersteller, habe er »Nanotechnologie« verwendet. Experten zufolge wurden die fraglichen Hosen einfach mit Teflon beschichtet, was die Oberflächenspannung mindert, sodass Flüssigkeiten weniger leicht haften bleiben. Zwar haben Moleküle tatsächlich Nanodimension, aber Teflon ist keineswegs neu.

▶ **Ein lose gewebtes Hemd schützt nicht vor Sonnenbrand.** Fester gewebte Stoffe erschweren aber den Luftaustausch, sodass ein Hemd daraus schnell feucht und klamm wird. Neuerdings mischen Faserhersteller Mattierungsmittel wie Titandioxid bei, die Ultraviolettstrahlen streuen.

▶ **Auch Winterkleidung soll für Feuchtigkeit durchlässig sein,** Wärme aber zurückhalten. Das gelingt mit hohlen Fasern, in denen Luft als Wärmeisolator eingeschlossen ist. Dieses Prinzip imitiert die Natur: Auch das Haar der Eisbären ist hohl.

Mitunter enthalten Garnbündel auf der Stoffinnenseite weniger, dafür größere Fasern, solche auf der Außenseite mehr und kleinere Fasern. Nach außen hin wächst so die innere Oberfläche der Fasern, das verstärkt den »Saugeffekt«. Die Feuchtigkeit verteilt sich zudem außen besser und kann so leichter verdampfen. Kühlende Luft dringt durch Lücken im Gewebe ein.

Der Polyester im häufig verwendeten Coolmax-Gewebe wird zu Fasern mit einem eingebuchteten ovalen Querschnitt gepresst. Auf diese Weise entstehen Mikrokanäle, die durch Kapillarwirkung Schweißperlen von der Haut leiten.



Neue Therapie bei Kreislaufschock

Zu den gefürchtetsten medizinischen Komplikationen gehört der Schock. Eine Zufallsentdeckung könnte dazu beitragen, die Aussicht auf Überleben zu erhöhen.

Von Donald W. Landry und Juan A. Oliver

Ein Schock im medizinischen Sinne ist immer lebensbedrohlich. In dieser Hinsicht ist es gleich, ob der totale Kreislaufzusammenbruch nun bei einem Herzinfarkt auftritt, nach einer Verletzung mit hohem Blutverlust, ob er zum Beispiel auf eine Sepsis, eine so genannte Blutvergiftung, zurückgeht oder auf eine heftige allergische Reaktion. Nach einer Erhebung in den USA stirbt etwa jeder zweite Patient, der aus einem solchen Grund einen akuten Kreislaufschock erleidet. Vielfach kennzeichnet der Zustand aber auch das letzte Stadium einer tödlichen Krankheit.

Ärzte kennen nur zu gut den fatalen Teufelskreis: Der Blutdruck sinkt so extrem, dass die Gewebe unzureichend oder gar nicht mehr mit frischem Blut versorgt werden. Erleiden dabei das Gehirn und andere lebenswichtige Organe ernsten Schaden, ist der Patient oft nicht mehr zu retten. Zwar verfügt die Notfallmedizin über ein Repertoire an Maßnahmen, um den Totalzusammenbruch aufzufangen. Doch in vielen Fällen wirken diese Schritte nicht wie gewünscht. Das gilt besonders für den septischen Schock, der auf einer außer Kontrolle geratenen Infektion beruht. Allein in Europa sterben hieran täglich wohl einige hundert Menschen.

Schon lange bemühen sich die Mediziner intensiv um effektivere Behandlungsmöglichkeiten, doch viel zu oft versagen immer noch alle Bemühungen. Auch einige in den letzten Jahren erprobte, zunächst viel versprechende Medikamente brachten dann doch nicht den Durchbruch. Hier möchten wir von einer Zufallsentdeckung berichten, die in vielen Fällen bereits zu einer wirksameren Therapie geführt hat.

Hier bemüht sich medizinisches Personal um einen Patienten, der, bedingt durch lebensbedrohlichen Blutverlust, unter Kreislaufschock steht.

Es handelt sich um ein Hormon, das auch im menschlichen Körper vorkommt: Vasopressin, auch Adiuretin genannt. Seine Verabreichung behebt zwar letztlich nicht die eigentlichen Ursachen des Schocks, aber es erweist sich jetzt schon bei der Behandlung betroffener Patienten als hilfreich. Vor allem brachten unsere Forschungen mit der Substanz auch neue Einsichten in die noch unzureichend verstandenen physiologischen Mechanismen eines Schocks. So steht zu hoffen, dass diese Erkenntnisse wie auch die umfangreichen Arbeiten anderer Wissenschaftlergruppen künftig die Überlebensaussichten bei diesem verheerenden Zusammenbruch des Organismus weiter heben.

Um die komplexen Mechanismen des Schocks zu verstehen, muss man sich den Sinn des Blutkreislaufs vergegenwärtigen. Die primitivsten tierischen Lebensformen benötigen noch keinen Kreislauf. Sauerstoff und Nährstoffe diffundieren einfach in die Zellen, Kohlendioxid und andere Schlackstoffe werden auf dem umgekehrten Weg entsorgt. Das Prinzip funktioniert allerdings nur über einige Millimeter Wegstrecke. Größere Tiere brauchen zu demselben Zweck Blut, das die Stoffe transportiert, und ein Kreislaufsystem, um das Blut zu bewegen. ▷

IN KÜRZE

- Nur jeder zweite Patient überlebt einen physiologischen Schock, bei dem die feinen Blutgefäße – die Arteriolen – ihren Dienst versagen. Weil wichtige Organe wegen des **totalen Kreislaufkollapses** nicht mehr durchblutet werden, ist dieser Zustand immer lebensbedrohlich. Insbesondere droht ein Schock bei einer **Blutvergiftung** oder Sepsis, einer außer Kontrolle geratenen Infektion.
- Wirklich effektive medizinische **Behandlungsmöglichkeiten** gegen den Kreislaufschock gibt es bisher kaum. Neue Ansätze erfüllen meist doch nicht die Erwartungen, weil entscheidende körperliche Reaktionen bei einem Schock anders verlaufen als sonst.
- Nun erweist sich die zufällig entdeckte Wirkung des Hormons **Vasopressin** (auch Adiuretin oder ADH genannt) als viel versprechend. Dieses Hormon vermag beim Schockzustand die feinen Blutgefäße enger zu stellen.



RICH PRESS

▷ Über Adern, die sich immer feiner verzweigen, gelangt sauerstoffreiches Blut bis in die Gewebe. Die feinsten Gefäße, die Kapillaren, haben hoch durchlässige Wände. Sie bilden im Körper insgesamt eine riesige Austauschfläche. Bei den meisten Tieren pumpt ein Herz das Blut durch die Adern, genauer gesagt in die Arterien und durch die feinen Arteriolen, die sich schließlich in Kapillarnetzen aufzweigen, bevor das Blut über Venen zurückbefördert wird. Normalerweise ist der erzeugte Druck hoch genug, um die Passage noch durch die feinsten Gefäße zu gewährleisten, die wegen ihres geringen Durchmessers den größten Widerstand bieten.

Täglich ungefähr tausendmal befördert unser Herz die etwa fünf Liter Blut des Menschen durch ein Gefäßnetz von insgesamt 15 Kilometer Länge. Schon sechs Sekunden Unterbrechung können genügen, um bewusstlos zu werden. Gehirnschäden durch Sauerstoffmangel drohen sehr schnell, wenn der Blutdruck nur etwas absackt. Es dauert auch kaum Minuten, bis andere Organe ebenfalls versagen. Das ist der Schockzustand. Hält er an und tragen Organe bleibende Schäden davon, stirbt der Betroffene.

Üblicherweise klassifizieren Mediziner Schockformen zum einen nach den verschiedenen auslösenden Ursachen. Sie sprechen etwa von einem septischen oder septisch-toxischen Schock und – bei Allergien – von einem anaphylaktischen Schock. Beziehungsweise sie unterscheiden auf einer übergeordneten Ebene nach dem Erscheinungsbild hauptsächlich drei Formen.

Hiervon gehört zu den häufigsten der »hypovolämische Schock«. Dieser Zustand tritt auf, wenn das Blutvolumen stark sinkt – etwa bei einer Verletzung, während einer Operation, wegen eines blutenden Magengeschwürs oder bedingt durch massiven Flüssigkeitsverlust bei Durchfall. Obwohl das Herz den Verlust durch sehr rasches Schlagen zu kompensieren versucht, fällt der Blutdruck stark ab. Wichtige Organe werden nicht mehr ausreichend versorgt.

An septischem Schock stirbt jeder zweite Betroffene

Zu den dringlichsten ärztlichen Sofortmaßnahmen gehört in diesem Fall, den Blut- und Flüssigkeitsverlust auszugleichen und die Blutung zu stoppen. Dies ist auch ein intensives Forschungsfeld. Unter anderem werden neue Möglichkeiten der Blutstillung zum Beispiel mit gerinnungsfördernden Gelen erprobt und neue Blutersatzlösungen getestet.

Einen »kardiogenen Schock« nennen Mediziner den Zustand, wenn das Herz versagt, das heißt die nötige Pumpleistung nicht mehr bringt. Häufig ist ein Infarkt die Ursache: Blockiert ein Blutgerinnsel eine Herzkranzarterie, bleiben Teile des Herzmuskels unterversorgt und sterben ab. Je nach Lage und Größe des Infarktareals ist dann die Herzfunktion massiv gestört. Auch Herzrhythmusstörungen, das Versagen einer Herzklappe, eine Lungenembolie oder eine Herzmuskelentzündung können zum kardiogenen Schock führen.

Die Behandlung bei dieser Schockform reicht von der Gabe von Medikamenten zur Steigerung der Herzleistung, dem Ersatz der defekten Herzklappe oder der Implantation eines Defibrillators bis hin zur Herztransplantation.

Die dritte und häufigste Form ist der »vasodilatatorische Schock« oder »Widerstandsverlustschock«. Dabei sind die feinen Gefäße so weit gestellt, dass das Blut kaum noch oder gar nicht mehr fließen kann. Manchmal tritt dieser Zustand nach mehreren Tagen bei einem hypovolämischen oder kardiogenen Schock auf, der sich trotz aller medizinischen Maßnahmen nicht regulieren ließ. Doch die meisten Fälle gehen auf eine Blutvergiftung oder Sepsis zurück, und man spricht auch von einem septischen Schock.

Dann überschwemmt eine Bakterien- oder Pilzinfektion den Körper und löst eine generelle Entzündungsreaktion aus. Um die Infektion zu bekämpfen, greifen weiße Blutkörperchen und ande-

Die drei Schockformen

Mediziner verstehen unter einem Schock, vereinfacht gesagt, einen anhaltenden bedrohlichen Blutdruckabfall. Der Sauerstoffmangel kann Organe schon nach wenigen Minuten schädigen. Notfallärzte unterscheiden drei Schockgrundformen.

Art des Schocks	mögliche Ursachen	Herz-/Kreislauffunktion	Arteriolenfunktion	Therapie
hypovolämischer Schock, Volumenmangelschock (durch starken Blut- oder Flüssigkeitsverlust)	schwere Verletzung Magenblutung starker Durchfall	Herzfunktion normal Blutvolumen stark erniedrigt	äußere Arteriolen eng gestellt, weil Blut nur noch die wichtigsten Organe versorgt; dadurch kalte Haut	Blutstillung (hierzu werden auch neue Verfahren erforscht) Ersatz des Blutvolumens und evtl. der Blutbestandteile durch Salzlösungen, Blutkonserven, Blutersatzlösungen etc.
kardiogener Schock (durch Pumpversagen des Herzens)	Herzinfarkt Versagen einer Herzklappe Herzrhythmusstörungen	Pumpfunktion des Herzens bei normalem Blutvolumen massiv gestört	äußere Arteriolen eng gestellt, weil Blut nur noch die wichtigsten Organe versorgt; dadurch kalte Haut	Medikamente zur Unterstützung der Herzfunktion Klappenersatz implantierbarer Defibrillator in schwersten Fällen: Herztransplantation
vasodilatatorischer Schock, Widerstandsverlustschock (durch Erweiterung der äußeren Arteriolen)	länger anhaltender hypovolämischer oder kardiogener Schock (trotz Beseitigung der primären Ursache) Blutvergiftung (Sepsis)	Herzfunktion normal Blutvolumen normal Fehlfunktion der Arteriolen	äußere Arteriolen weit gestellt; dadurch warme Haut Unterversorgung von Organen	zusätzlich zu evtl. obigen Maßnahmen u. a.: Entzündungshemmung durch Steroide, Antibiotika, Vasopressin

re Komponenten des Immunsystems die Organe an. Etwa jeder zweite Betroffene stirbt dabei trotz intensivster medizinischer Bemühungen – obwohl das Herz einwandfrei funktioniert und sich die Haut, anders als bei den anderen beiden Schockformen, warm anfühlt.

Das Problem liegt bei den feinsten Arterien: den Arteriolen, die sich in die Kapillarnetze aufzweigen. Dass die Therapie unter anderem dort ansetzen müsste, vermuten Wissenschaftler seit langem. Auch wir machten unsere Zufallsentdeckung vor sechs Jahren bei Versuchen, die Entgleisung der Arteriolen in den Griff zu bekommen.

Normalerweise reagiert der Körper auf sinkenden Blutdruck durch Gegensteuerung, indem er die Gefäße, insbesondere die Arteriolen, enger stellt. Das geschieht durch Kontraktion ihrer Wandmuskulatur. Die Arteriolenweite wird in einem hochkomplexen Regelsystem durch eine Vielfalt von Signalsubstanzen gesteuert. Dazu gehören Hormone und andere Stoffe, unter anderem Noradrenalin, Vasopressin, Angiotensin II, Dopamin und Stickstoffmonoxid.

Fällt der Blutdruck, treten Noradrenalin und Angiotensin II ins Blut über. Sie wirken vasokonstriktorisch, das heißt sie verengen die Arteriolen. Gleichzeitig wird die Freisetzung einer gefäßerweiternden, also vasodilatatorischen Substanz, des natriuretischen Peptids, gedrosselt. Funktioniert diese Steuerung, dann werden die Arteriolen etwa in der Haut und in manchen Muskeln eng. Nur die wichtigsten Organe erhalten noch frisches Blut. So reagiert der Körper auch bei einem hypovolämischen Schock, sozusagen um wenigstens die wichtigsten Körperfunktionen aufrechtzuerhalten.

Suche nach Verdächtigen

Doch wenn der Engstellmechanismus versagt und sich die Arteriolen unwichtigerer Organe nicht zusammenziehen, wenn also keine solche Umverteilung des Bluts stattfindet, bleiben unter dem zu niedrigen Blutdruck auch lebenswichtige Organe unterversorgt. Eben das ist beim vasodilatatorischen Schock der Fall, geschieht also auch beim septischen Schock.

Dennoch weisen diese Patienten erstaunlicherweise hohe Blutspiegel von Noradrenalin und Angiotensin II auf – fehlende vasokonstriktorische Stimuli sind also offenbar nicht schuld an dem Desaster. Hierzu passt, dass es wenig nützt, diesen Schockpatienten die beiden Substanzen zu verabreichen. Die Wände der Arteriolen reagieren darauf einfach nicht mehr so wie normalerweise. Daraus schlossen Mediziner früher, dass die Wurzel des Übels irgendwo bei den Muskelzellen der Arteriolenwände liegen müsse.



Mitte der 1980er Jahre erkannten sie, dass der Fehler weniger in den Gefäßwänden selbst zu suchen ist als wesentlich auf ein Überangebot an Stickstoffmonoxid (NO) zurückgeht. Dass dieses einfache Molekül bei vielen Körperfunktionen entscheidend mitwirkt, ist noch nicht lange bekannt. Unter anderem sorgt es für die Erweiterung der Gefäße. Es ist sogar die wichtigste vasodilatatorische Substanz.

Wie sich herausstellte, steigern Zellen ihre Stickstoffmonoxidsynthese unter Infektionen wie einer Lungen- oder Hirnhautentzündung, die zu einer Blutvergiftung entgleisen können. Alsbald erfolgte eine klinische Studie, bei der ein Hemmstoff gegen dieses Molekül eingesetzt wurde. Ohne Stickstoffmonoxid, so damals die Hoffnung, würden die vasokonstriktorischen Substanzen Noradrenalin und Angiotensin II wunschgemäß wirken. Doch die Studie verlief enttäuschend. Es gab sogar mehr Komplikationen und Todesfälle als sonst, vermutlich wegen der vielen anderen, erst teilweise verstandenen Funktionen des kleinen Moleküls, die nun gestört wurden.

Auch ein anderer Ansatz, auf den wir 1992 stießen, hat leider schwere Nebenwirkungen. Wir hatten überlegt, woran es liegen könnte, dass Noradrenalin und Angiotensin II bei einem Schock auf die Gefäßmuskelzellen keinen Einfluss mehr haben. Unser Verdacht war, dass sich die komplex gesteuerten Elektrolytverhältnisse an ihren Außenmembranen aus irgendwelchen Gründen nicht mehr regulieren lassen (siehe Kasten S. 46).

Die Außenmembranen aller Zellen weisen zwischen ihrer Innen- und Außenseite eine elektrische Spannung auf, ein so genanntes Membranpotenzial. Das hängt mit der unterschiedlichen Verteilung der positiv oder negativ geladenen Elektrolyte – einfachen Ionen von Salzen bis hin zu großen Molekülen wie Proteinen – in den Zellen und außerhalb zusammen. Für einige dieser Elektrolyte besitzt die Zelle spezifische Ionenkanäle in ihrer Außenmembran, um sie, auch entgegen dem chemischen oder physikalischen Gefälle, ein- oder auszuschleusen.

Schädliche Reaktionen von Muskelzellen

Das Membranpotenzial beruht hauptsächlich auf der Verteilung der positiv geladenen Kalium-Ionen. An der Innenseite der Zellmembran sind sie stets reichlich vorhanden, doch durch besondere Kanäle sickern sie auch nach außen. Dennoch haben Zellen Möglichkeiten, diese Verteilung zu beeinflussen.

Was nun die Außenmembran einer Muskelzelle der Arteriolenwand betrifft, so ist dort die Spannung nicht konstant, sondern sie verschiebt sich mit der Ionenverteilung. Hierüber steuern die Muskelzellen ihre Kontraktion – genauer gesagt den dazu erforderlichen Einstrom von Kalzium-Ionen. Wenn außen eine leicht negative Ladung gegen innen herrscht – also wenig Kalium-Ionen nach außen gelangt sind – und die Zelle ▷

▷ zugleich Signale von Noradrenalin oder Angiotensin II erhält, dann öffnen sich spezifische Membrankanäle, durch die Kalzium-Ionen in die Zelle dringen.

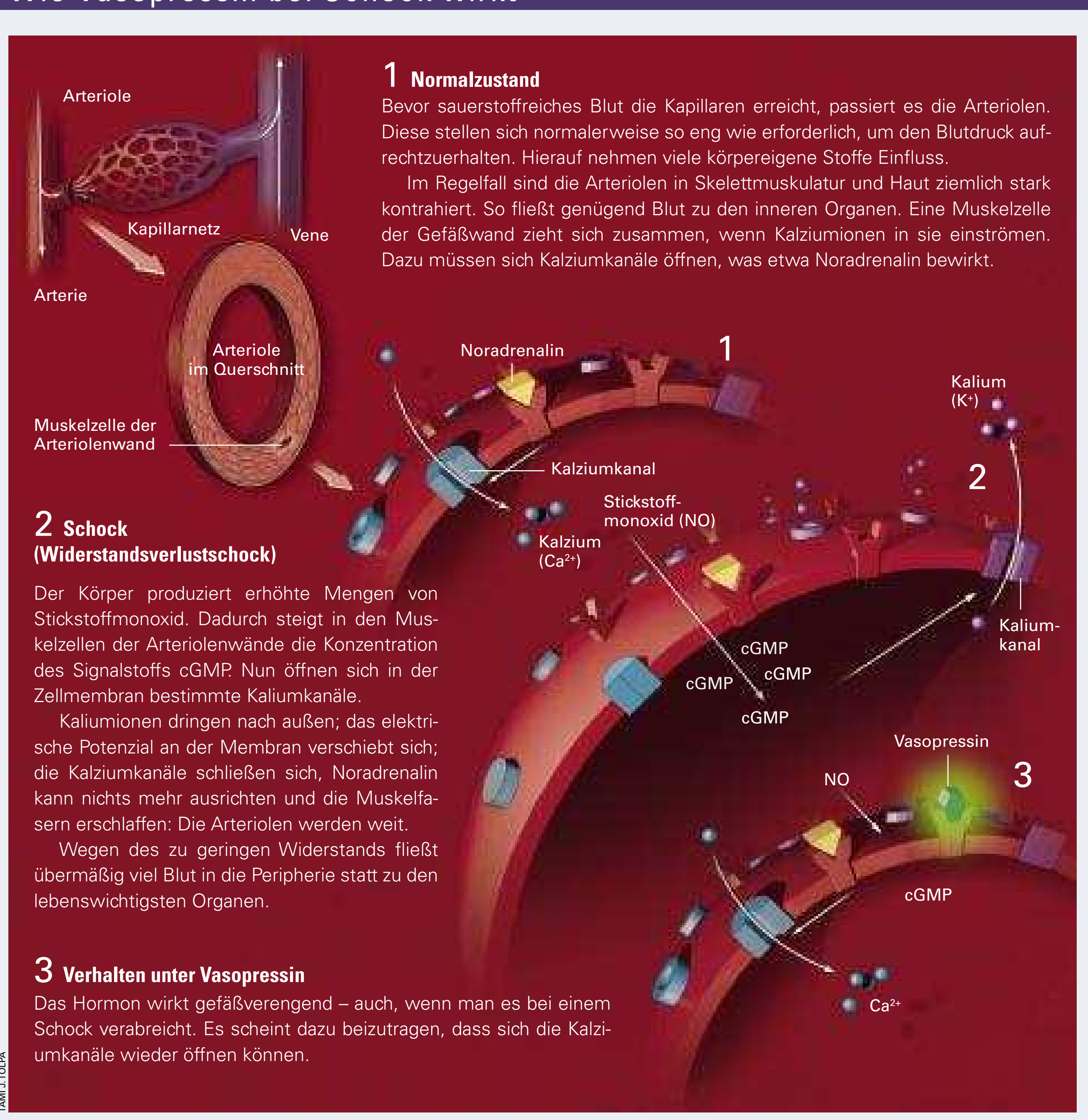
Umgekehrt erschlafft die Muskelzelle der Arteriolenwand, wenn außen eine positivere Ladung herrscht, weil viele Kalium-Ionen nach außen wandern konnten. Denn dann schließen sich die Membrankanäle für Kalzium-Ionen und der Kalziumspiegel in der Zelle sinkt. Nun können Noradrenalin und Angiotensin II nichts mehr ausrichten. Das bedeutet, die Kalziumkanäle können auf die gefäßverengenden Signalstoffe nur bei den passenden Ladungsverhältnissen ansprechen.

Anders und einfacher gesagt: Die Kalziumkanäle steuern zwar, ob sich die Arteriolenmuskulatur zusammenzieht. Doch die Kontrolle darüber, ob sie sich öffnen können, üben Kaliumkanäle aus – die letztlich die Ladungsverhältnisse an den Zellmembranen herbeiführen.

Für unser Problem ist bedeutsam, dass die Kaliumkanäle ihrerseits von verschiedensten Substanzen abhängen. So ist dafür der zelluläre Energieträger ATP (Adenosintriphosphat) wichtig – ein Molekül, das die Energie aufnimmt, die beim Abbau von Nährstoffen gewonnen wird, und sie später wieder zum Stoffwechsel beisteuert. Zum Umsetzen der Nährstoffe benötigt die Zelle Sauerstoff.

Sinken bei Sauerstoffmangel die ATP-Spiegel, so öffnen sich einige Kaliumkanäle. Nun strömen rasch Kalium-Ionen in größeren Mengen aus der Zelle. Das aber bedeutet eine Verschiebung hin zu einer positiven Ladung an der Außen-

Wie Vasopressin bei Schock wirkt



1 Normalzustand
Bevor sauerstoffreiches Blut die Kapillaren erreicht, passiert es die Arteriolen. Diese stellen sich normalerweise so eng wie erforderlich, um den Blutdruck aufrechtzuerhalten. Hierauf nehmen viele körpereigene Stoffe Einfluss.

Im Regelfall sind die Arteriolen in Skelettmuskulatur und Haut ziemlich stark kontrahiert. So fließt genügend Blut zu den inneren Organen. Eine Muskelzelle der Gefäßwand zieht sich zusammen, wenn Kalziumionen in sie einströmen. Dazu müssen sich Kalziumkanäle öffnen, was etwa Noradrenalin bewirkt.

2 Schock (Widerstandsverlustschock)
Der Körper produziert erhöhte Mengen von Stickstoffmonoxid. Dadurch steigt in den Muskelzellen der Arteriolenwände die Konzentration des Signalstoffs cGMP. Nun öffnen sich in der Zellmembran bestimmte Kaliumkanäle.

Kaliumionen dringen nach außen; das elektrische Potenzial an der Membran verschiebt sich; die Kalziumkanäle schließen sich, Noradrenalin kann nichts mehr ausrichten und die Muskelfasern erschlaffen: Die Arteriolen werden weit.

Wegen des zu geringen Widerstands fließt übermäßig viel Blut in die Peripherie statt zu den lebenswichtigsten Organen.

3 Verhalten unter Vasopressin
Das Hormon wirkt gefäßverengend – auch, wenn man es bei einem Schock verabreicht. Es scheint dazu beizutragen, dass sich die Kalziumkanäle wieder öffnen können.

seite der Zellmembran. Folglich schließen sich die Kalziumkanäle und die Muskelfaser erschlafft: Die Arteriolen werden weit und der Blutdruck sinkt.

Bei einem Schock wird der Sauerstoff vielerorts knapp. Es lag nahe zu vermuten, dass dadurch ein ATP-Mangel entsteht, dass sich deswegen die Kaliumkanäle weit öffnen und dass die Arteriolenwände in der Folge erschlaffen. Ob der Schockzustand wirklich mit dem fehlenden ATP zusammenhängen könnte, prüften wir mit dem Wirkstoff Glibenclamid, der die Funktion ATP-abhängiger Kaliumkanäle hemmt. Tatsächlich beobachteten wir, dass der Blutdruck nun wieder anstieg. Das erklärt, weshalb die Gabe von Noradrenalin oder Angiotensin II Schockpatienten so wenig hilft: Wenn die Kaliumkanäle der Gefäßmuskelzellen offen stehen, können die gefäßerweiternden Signalstoffe natürlich nicht viel ausrichten.

Wie schon angedeutet, hat auch Glibenclamid bei der Schockbehandlung beträchtliche Nebenwirkungen, abgesehen davon, dass der Blutdruckanstieg nicht lange vorhält. Verabreichte man das Präparat in den Mengen, wie sie zur Schockbehandlung erforderlich wären, sänke der Blutzuckerspiegel gefährlich ab. Denn das Medikament regt die Bauchspeicheldrüse zur Insulinausschüttung an. Deswegen erhalten es, allerdings in geringeren Dosierungen, manche Patienten mit Altersdiabetes.

Überraschung durch Vasopressin

Die Situation war frustrierend: Wir kannten einzelne physiologische Mechanismen des Schockgeschehens, nur fand sich kein Weg, sie zum Nutzen des Patienten zu verwenden. Das änderte sich plötzlich 1997. Damals behandelten wir einen Patienten mit Blutungen der Speiseröhre, der dann eine schwere Infektion entwickelte.

Gleich bei der Aufnahme in die Klinik erhielt der Mann gegen die Blutungen das Hormon Vasopressin oder Adiuretin (ADH). Es war bekannt, dass die Hypophyse dieses Hormon bei niedrigem Blutdruck ausschüttet und dass es die Blutgefäße verengt – sofern es aus dem Körper selbst stammt. Früheren medizinischen Studien zufolge wirkte verabreichtes Vasopressin in dieser Weise allerdings nur bei den Gefäßen der Speisesöhre. Was wir nicht erwartet hatten: Als die Blutungen aufhörten und wir das Hormon absetzten, sank der Blutdruck des Patienten. Daraufhin gaben wir ihm wieder Vasopressin – und der Blutdruck stieg. Reagierte der Mann wegen der Infektion besonders empfindlich auf den Wirkstoff?

Die Erfahrung ermutigte uns, einen Patienten mit septischem Schock mit Vasopressin zu behandeln. Wir mussten sehr behutsam vorgehen. Schließlich lautet das erste ärztliche Prinzip: »Primum nil nocere«, »vor allem nicht schaden«. Darum begannen wir mit einem Zehntel der Dosis, die der Kranke mit der Speiseröhrenblutung erhalten hatte. Hiervon erwarteten wir noch keinen Effekt auf den Blutdruck. Doch wir irrten: Er stieg sofort deutlich an. Wie anschließende Untersuchungen ergaben, ist der Vasopressinspiegel beim septischen Schock offenbar besonders niedrig. Das war er auch bei dem Patienten mit der Speiseröhrenblutung gewesen.

Das Gegenteil hätten wir vorausgesagt. Eigentlich sollte der Körper das Hormon bei gefährlich niedrigem Blutdruck in großer Menge freisetzen. Weitere Nachforschungen brachten eine plausible Erklärung. Tatsächlich ist der Vasopressinspiegel im Blut zu Beginn eines Schockzustands extrem hoch, unabhängig davon, was die fatale Situation auslöste. Nach ein paar Stunden geht er jedoch zurück. Anscheinend mobilisiert der Körper anfänglich sämtliche Reserven des Hormons. Die Substanz wird aber bald abgebaut, und nennenswerten Nachschub kann der Körper so schnell nicht liefern.

Später stießen wir auf zwei diesbezügliche Veröffentlichungen. Wegen der herrschenden Meinung, eine Vasopressingabe würde bei einem Schock nichts nützen, hatten wir diese Forschungen bisher nicht zur Kenntnis genommen. Nun erfuhren wir, dass das Hormon dem gefäßerweiternden Effekt von Stickstoffmonoxid an den Arteriolen entgegenwirkt. Außerdem, so lernten wir, inaktiviert Vasopressin ATP-abhängige Kaliumkanäle. Dadurch können sich die Kalziumkanäle öffnen, und die Muskelzelle kontrahiert sich.

Inzwischen liegen zehn kleinere Studien aus verschiedenen Ländern vor, in denen Forscher die Wirkung von Vasopressin bei Schockpatienten untersucht haben. Wie sich zeigte, stellt das Hormon den Blutdruck in diesem Zustand verlässlich wieder her – ohne bedeutende Nebenwirkungen zu verursachen. Zahlreiche Fallberichte von Ärzten bestätigten diesen Befund. In etlichen großen Kliniken weltweit erhalten Patienten bei einem vasodilatatorischen Schock jetzt Vasopressin. Zurzeit läuft an Patienten mit einer Blutvergiftung eine Großstudie, die genauer klären soll, ob die Normalisierung des Blutdrucks auch andere Schocksymptome bessert und ob mehr Patienten überleben. Das Medikament herzustellen ist nicht einmal teuer, weil Vasopressin nicht patentgeschützt ist.

Ein Ansatz unter vielen

Dies ist bei weitem nicht der einzige neue Ansatz im Kampf gegen den Kreislaufschock. In den letzten Jahren konnten Forscher zum Beispiel einzelne Schritte der generalisierten Entzündungsreaktion aufklären, die bei einer Blutvergiftung den Schock herbeiführt. Unter anderem möchten sie den Ablauf gezielt mit maßgeschneiderten Antikörpern unterbrechen, die einzelne Reaktionspartner außer Gefecht setzen würden. Sie prüfen auch, inwieweit entzündungshemmende Steroide (etwa Cortisonabkömmlinge) die Kaskade in Grenzen zu halten vermögen.

Zu erleben, wie sich einzelne Erkenntnisse über die Blutdruckregulation und den Kreislaufschock durch einen Zufall plötzlich zusammenfügten, war aufregend. Mit besonderer Genugtuung erfüllt uns, dass der daraus entwickelte neue Therapieansatz so rasch den Weg in erste Kliniken fand. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE



Donald W. Landry (oben) und **Juan A. Oliver** haben beide Professuren am College für Internisten und Chirurgen an der Columbia-Universität in New York. Landry leitet die Abteilungen für Nephrologie und für experimentelle Therapie. Oliver begann seine medizinische Ausbildung in Barcelona, forschte dann an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) und hat heute eine Professur für klinische Medizin.

Präklinische Versorgung des Patienten mit Schock. Von Frank Christ und Christian K. Lackner in: Internist, Bd. 45, Nr. 3, S. 267, März 2004

The pathogenesis of vasodilatory shock. Von D. W. Landry und J. A. Oliver in: New England Journal of Medicine, Bd. 345, Heft 8, S. 588, 23. August 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Cassini – Ankunft am Saturn



Nach siebenjähriger Reise ist die Doppelsonde Cassini-Huygens am zweitgrößten Planeten des Sonnensystems eingetroffen und hat bereits erste Aufnahmen geliefert. Im Mittelpunkt der Erkundung stehen der Riesenplanet selbst sowie sein Ringsystem, sein größter Mond Titan und die rund 30 weiteren Trabanten.

Von Jonathan I. Lunine

Frühmorgens am 15. Oktober 1997, noch vor Sonnenaufgang, fand ich mich am Rand einer alligatorverseuchten Bucht nahe Cape Canaveral in Florida ein. Einige Kilometer entfernt glänzte eine Rakete im Flutlicht der Startrampe. Mit Tausenden anderer Zuschauer beobachtete ich, wie eine kleine Flamme aus den Triebwerken schoss und rasch anschwoll. Nur dieser feurige Schweif war zu sehen, als die Trägerrakete abhob, eine Kumuluswolke durchstieß und nach Osten in Richtung Weltraum entschwand.

An Bord befand sich die größte Raumsonde, die jemals gebaut worden war: der Orbiter Cassini und die Landeeinheit Huygens. Eine sieben Jahre lange Reise durch den interplanetaren Raum lag vor diesen Lkw-großen Instrumententrägern. Schon als Doktorand war ich an der Planung der Mission beteiligt. Doch ich musste bis zur Mitte meiner wissenschaftlichen Laufbahn warten, um den Höhepunkt zu erleben: die erste Langzeiterkundung des Saturnsystems.

Nun ist es so weit: Am 1. Juli schwenkte Cassini-Huygens in eine Umlaufbahn um den zweitgrößten Planeten des Sonnensystems ein. Seit den Missionen Pioneer 11 und Voyager 1 und 2 vor mehr als 20 Jahren haben Wissenschaftler ungeduldig auf diesen Tag gewartet.

Titan: Modellsystem für die Erde?

Obwohl seine Oberfläche weit weniger dramatische Vorgänge aufweist als der näher gelegene und größere Jupiter, könnte Saturn wichtige Hinweise auf die langfristige Entwicklung aller Gasplaneten liefern. Saturns Gefolge besteht aus 30 kleinen eisigen Monden und einem weiteren Trabanten, der sogar größer ist als der Planet Merkur. Dieser Mond, Titan, hat eine dichte Atmosphäre, die wie die irdische Lufthülle hauptsächlich aus Stickstoff besteht. Die Wissenschaftler erhoffen sich deshalb Hinweise darauf, wie einst das Leben auf der Erde entstanden sein könnte. Des Weiteren möchten sie verstehen, woher die Ringe des Saturns stammen und wie das starke Magnetfeld des Planeten die Eismonde und die obere Atmosphäre Titans beeinflusst.

Die Cassini-Huygens-Mission könnte den Erfolg der Sonde Galileo wiederholen, die während ihrer achtjährigen Untersuchungen unser Wissen über Jupiter und seine Monde revolutionierte. Dennoch gibt es fundamentale Unterschiede zwischen den beiden Missionen. Galileo setzte eine Instrumentenkapsel frei, die Jupiters Atmosphäre untersuchte. Der Cassini-Orbiter wird die Huygens-Tochtersonde zu dem Mond Titan und nicht zu dem Gasplaneten Saturn schicken. Und im Gegensatz zu Galileo ist Cassini-Huygens ein wahrhaft internationales Unternehmen: Die Nasa baute den Orbiter und leitet die Mission, die Europäische Raumfahrtbehörde Esa entwickelte die Huygens-Sonde; die Teams, welche die wissenschaftlichen Experimente auf den Raumfahrzeugen betreuen, setzen sich aus Europäern und Amerikanern zusammen.



Die Landung der Eintauchsonde Huygens auf dem größtem Saturnmond, Titan, wird einer der Höhepunkte der Cassini-Huygens-Mission sein. Durch die Analyse chemischer Verbindungen in Titans Atmosphäre und auf seiner Oberfläche erhoffen sich die Wissenschaftler Rückschlüsse darauf, wie vor Jahrmilliarden das Leben auf der Erde entstand.

Saturn ist von der Sonne fast doppelt so weit entfernt wie Jupiter – 1,4 Milliarden Kilometer anstelle von 780 Millionen. Allein deshalb schon ist er seit jeher der Forschung schwerer zugänglich. Im Vergleich zu Jupiter weist seine Atmosphäre weniger helle und dunkle Wolkenbänder auf, aus denen sich auf Windströmungen schließen lässt. Saturns Magnetosphäre – die Region, die durch das Magnetfeld des Planeten dominiert wird – ist viel ruhiger als diejenige von Jupiter, welche sogar Radiosignale erzeugt, die auf der Erde zu registrieren sind. Die Atmosphäre Titans entdeckten Astronomen im Jahr 1943, aber bis zum Raumfahrtzeitalter wusste man nur wenig über ihn und die anderen Saturnmonde.

Das erste Raumfahrzeug, das dem beringten Riesenplaneten einen Besuch abstattete, war Pioneer 11. Nach ihrem Vorbeiflug an Jupiter 1974 zog die Sonde fünf Jahre später an Saturn vorbei. Ihre Instrumente entdeckten eine weitere Komponente des Ringsystems (den so genannten F-Ring). Aus großer Entfernung untersuchte sie die Eigenschaften der Saturnatmosphäre und bestimmte die Stärke und Geometrie des planetaren Magnetfelds.

Voyager 1 und 2, die 1980/81 durch das Saturnsystem flogen, verfügten über empfindlichere Kameras und Spektrometer. Mit ihnen wurden unerwartete Strukturen in den Saturnringen entdeckt: dunkle, radiale Striche, die wie die Speichen eines Rads aussehen. Offenbar sind sie auf elektromagnetische Effekte zurückzuführen, die Staub aus der Ringebene herausheben. Dieses Phänomen sowie andere Messungen zeigen, dass die Größe der Partikel, aus denen die Ringe bestehen, von Staubkörnern bis zu mächtigen Felsbrocken variiert.

Die Voyager-Sonden lieferten auch einzelne Bilder von einigen der vereisten Saturnmonde. Auf den Fotos ist zu sehen, dass unterschiedlich starke Schmelzprozesse die Oberflächen umgestalteten. Aber es war Titan, der für die spannendsten Entdeckungen sorgte. Voyager 1 näherte sich diesem Trabanten bis auf 4000 Kilometer; Titan ist nach Jupiters Ganymed der zweitgrößte Mond im Sonnen- ▷

IN KÜRZE

▶ **Nach siebenjähriger Reise** erreichte die Doppelsonde Cassini-Huygens am 1. Juli 2004 den Saturn und schwenkte in eine Umlaufbahn um den Planeten ein.

▶ **Bis 2008** untersucht der Orbiter Cassini die Atmosphäre des Riesenplaneten, seine Monde, die Ringe und das Magnetfeld.

▶ **Im Dezember 2004** wird Cassinis Tochtersonde Huygens Kurs auf Titan, den größten Saturnmond, nehmen und nach dreiwöchigem Flug in seine Atmosphäre eindringen. Die Oberfläche des Himmelskörpers ist womöglich mit Seen oder Meeren aus flüssigen Kohlenwasserstoffen bedeckt.

system. Dichter orangefarbener Dunst verhinderte zwar den Blick auf die Oberfläche Titans. Doch andere Instrumente maßen Temperatur und Druck der Atmosphäre und fanden heraus, dass Stickstoff das am häufigsten vorkommende Gas ist, gefolgt von Methan.

Die Sonde entdeckte zudem, dass Titans Atmosphäre ähnlich dynamisch ist wie die irdische – nur übernimmt im Wettergeschehen auf dem Saturnmond Methan die Rolle, die auf der Erde dem Wasser zukommt.

Ehrgeiziges Unternehmen

Methan bildet auch die Grundlage organisch-chemischer Reaktionen, die in Titans oberer Atmosphäre ihren Anfang nehmen, wenn die UV-Strahlung der Sonne das aus einem Kohlenstoff- und vier Wasserstoffatomen bestehende Molekül aufbricht. Wissenschaftler vermuten, dass es in diesem atmosphärischen Kreislauf flüssige Kohlenwasserstoffe regnet. Der Niederschlag könnte sich in Seen und Ozeanen auf der Oberfläche sammeln. Die Temperatur auf der Oberfläche – rund 95 Kelvin oder –178 Grad Celsius – ist viel zu niedrig, als dass flüssiges Wasser existieren könnte. Aber für Tümpel aus flüssigen Kohlenwasserstoffen ist sie gerade passend. Leben, so wie wir es kennen, hat sich auf Titan wohl nie entwickelt. Doch die Untersuchung der organisch-chemischen Kreisläufe auf diesem Himmelskörper könnte Hinweise darauf liefern, wie das Leben auf der Erde in ihrer Frühzeit entstand.



NASA / JPL / SPACE SCIENCE INSTITUTE

Während des Vorbeiflugs an dem Saturnmond Phoebe am 11. Juni 2004 fotografierte Cassini den nur 220 Kilometer großen Brocken. Der Himmelskörper scheint sehr viel Eis zu enthalten und an seiner Oberfläche von dunklerem Material bedeckt zu sein.

Die Ergebnisse der Voyager-Sonden ermutigten die Forscher, einen Orbiter zu planen, der das Saturnsystem ausgiebig untersuchen könnte. Aber in den frühen 1980er Jahren waren die Mittel für die Planetenforschung begrenzt. Vertreter der Nasa und der Esa überlegten sich schließlich, ihre Ressourcen zu bündeln. 1982 und 1983 trafen sich Teams aus Europa und den USA, um gemeinsame Projekte zur Erforschung des Sonnensystems zu entwerfen. Eine Mission zum Saturnsystem stand ganz oben auf ihrer Wunschliste.

Einigkeit bestand darin, mit einem Orbiter Saturns Atmosphäre, Ringe, Monde und Magnetosphäre zu erforschen. Gerungen wurde darum, ob man eine Sonde in die Atmosphäre Saturns oder Titans schicken sollte oder sogar zu beiden Himmelskörpern. Die letzte Möglichkeit musste schließlich aus Kostengründen verworfen werden. Letztlich entschieden sich die Projektplaner wegen der faszinierenden Entdeckungen der Voyager-Sonde für Titan.

Bis 1985 entwickelte die Esa ein neuartiges Design für eine Eintauchsonde, die mit den Umgebungsbedingungen in Titans Atmosphäre zurechtkommen sollte. Benannt wurde die Kapsel nach dem niederländischen Astronomen Christiaan Huygens, der Titan im 17. Jahrhundert entdeckt hatte. Der Orbiter, der vom Jet Propulsion Laboratory in Pasadena (Kalifornien) gebaut wurde, erhielt seinen Namen von dem französisch-italienischen Astronomen Giovanni Domenico Cassini, der – ebenfalls im 17. Jahrhundert – vier weitere Monde des Saturns sowie eine große Teilung in seinen Ringen entdeckt hatte.

Die gesamten Entwicklungskosten der Mission von etwa 3 Milliarden US-Dollar – von denen die Europäer rund 25 Prozent trugen – sind im Vergleich zu den meisten Planetenmissionen hoch, aber dennoch vergleichbar mit denen anderer Großprojekte wie dem Hubble-Weltraumteleskop.

Der Cassini-Orbiter und die Huygens-Sonde bilden zusammen das größte interplanetare Raumschiff, das je gebaut wurde. Zwölf wissenschaftliche Experimente transportiert der Orbiter und sechs weitere die Eintauchsonde (kleines Bild im Kasten auf S. 54). Inklusive Treibstoff wog Cassini-Huygens beim Start 5,6 Tonnen und war 6,8 Meter hoch. Weil Cassini fast doppelt so weit wie Galileo reisen musste, benötigte das Raumfahrzeug ein aufwändigeres Kommunikationssystem. Die Antennen konstruierte die Italienische Raumfahrtbehörde. Größere Treibstoffvorräte für Bahnkorrekturen und leistungsfähigere Batterien waren ebenfalls erforderlich. Wie Galileo erzeugt auch Cassini seine Energie aus dem radioaktiven Zerfall des Elements Plutonium, dessen Zerfallswärme in Strom umgewandelt wird.

Eiertanz durchs Sonnensystem: Auf verschlungenen Pfaden zum Ziel

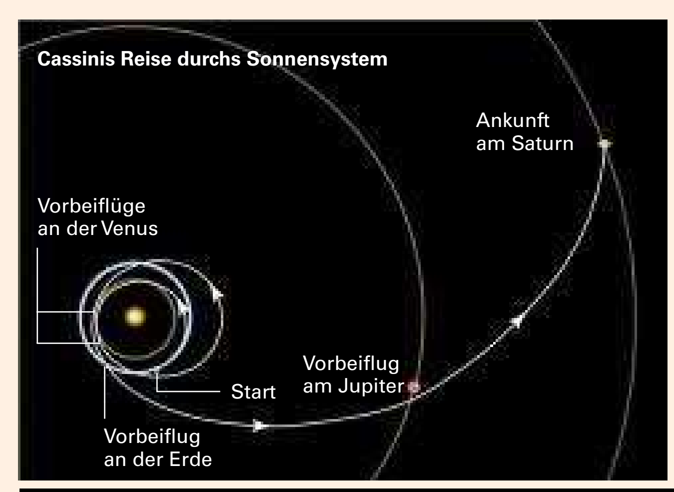
Obwohl Cassini-Huygens mit der damals leistungsfähigsten Rakete gestartet wurde – einer Titan-4 der US-Luftwaffe, wobei die oberste Stufe von einer Centaur-Rakete stammte –, war das Gerät viel zu schwer, um direkt zum Saturn geschickt zu werden. Wie es sich schon bei früheren Missionen zum äußeren Sonnensystem bewährt hatte, holte sich Cassini die notwendige Geschwindigkeit durch eine Reihe naher Vorbeiflüge an Planeten, bei denen das Raumfahrzeug jedes Mal etwas beschleunigt wurde. Zwischen 1998 und 2000 passierte Cassini zweimal die Venus sowie je einmal die Erde und den Jupiter.

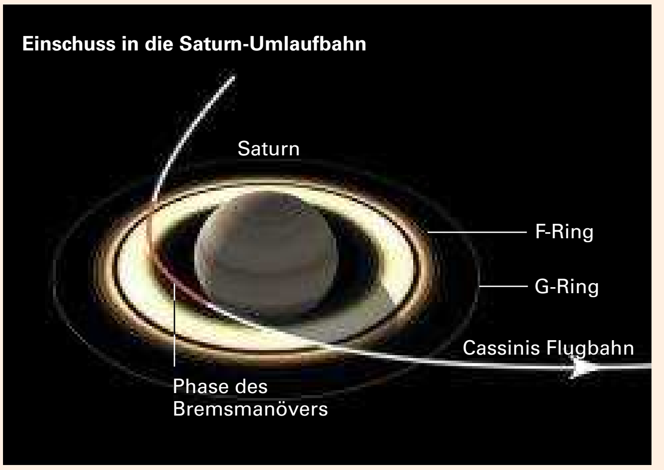
Während des Vorbeiflugs an Jupiter im Dezember 2000 untersuchte Cassini das Magnetfeld des Riesenplaneten – und ergänzte damit die Messungen der Galileo-Sonde, die den Riesenplaneten in geringerer Distanz umrundete. Erstmals überhaupt wurden derartige Messungen simultan vorgenommen. Die Analyse ergab, dass Jupiters Magnetosphäre unsymmetrisch ist: An einer Seite treten ungewöhnlich viele Ionen und Elektronen aus. Cassini lieferte auch bemerkenswerte Bilder von Jupiter, auf denen selbst feine Details der turbulenten Atmosphäre zu sehen sind.

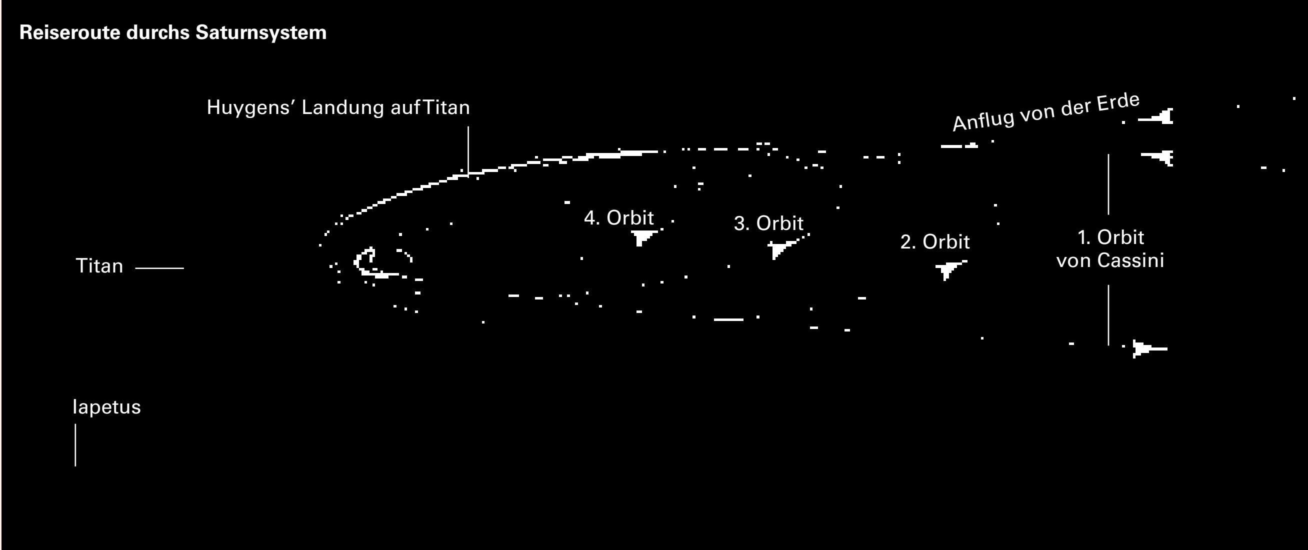
Die komplizierte Reiseroute bot noch einen weiteren Vorteil: Die Nasa und die Esa hatten ausreichend Zeit, ein unvorhergesehenes Problem zu lösen. Im Jahr 2000 fanden die Projektverantwort-

Trickreiche Flugroute

Auf ihrem Weg zum Saturnsystem hat die Cassini-Huygens-Sonde mehr als 3 Milliarden Kilometer zurückgelegt. Nach dem Start im Oktober 1997 holte sie durch nahe Vorbeiflüge an den Planeten Venus (zweimal), Erde und Jupiter Schwung, damit sie ihre nötige Reisegeschwindigkeit erreichte (Grafik unten links). Am 1. Juli 2004 ist die Sonde durch die Lücke zwischen Saturns F- und G-Ring geflogen. Während der größten Annäherung an den Planeten zündete sie ihr Triebwerk entgegen der Flugrichtung. Durch dieses Bremsmanöver (rotes Bahnstück in der Grafik unten rechts) gelangte das Raumfahrzeug in eine elliptische Umlaufbahn. Nachfolgende Bahnkorrekturen verkleinern den Orbit, sodass die Huygens-Sonde den Saturnmond Titan erreichen kann.







ALLE GRAFIKEN: DON DIXON

lichen einen Designfehler in Cassinis Kommunikationssystem, das während des Abstiegs der Huygens-Sonde zur Titan-Oberfläche Daten empfangen soll. (Der Orbiter dient als Relaisstation für die Datenübertragung zur Erde.) Ein Verbindungstest, in dem die erwartete Doppler-Verschiebung in Huygens' Sendefrequenz simuliert wurde, schlug fehl: Der Empfänger auf dem Orbiter registrierte kein Signal, weil die verschobene Frequenz außerhalb seiner Bandbreite zu liegen kam. Nach monatelangen Beratungen fanden die Experten schließlich eine Lösung: Die geplante Flugbahn wurde so verändert, dass die Relativgeschwindigkeit zwischen Orbiter und Eintauchsonde und damit auch die Doppler-Verschiebung kleiner wird.

Cassinis erste nahe Begegnung mit dem Saturnsystem fand bereits am 11. Juni 2004 statt, als sie an Phoebe vorbeiflog, einem Mond, der sich auf einer irregulären Bahn in rund 13 Millionen Kilometer Abstand vom Planeten bewegt. Cassini passierte den 220 Kilometer großen Himmelskörper in nur 2000 Kilometer Abstand (Foto auf der linken Seite). Er fasziniert die Wissenschaftler deshalb, weil er ein Überbleibsel des ursprünglichen Baumaterials sein könnte, aus dem sich vor mehr als 4,5 Milliarden Jahren die steinigen Kerne der äußeren Planeten formten. Drei Wochen später, am 1. Juli, näherte sich die Raumsonde dem Planeten und durchflog von unten her kommend die Ringebene durch die breite Lücke zwischen dem F- und G-Ring. Um das Raumfahrzeug so weit abzubremsen, dass es in eine Umlaufbahn einschwenken kann, zündete es für 96 Minuten sein Haupttriebwerk entgegengesetzt zur Flugrichtung. Dieses Bremsmanöver, das in nur 18 000 Kilometer Abstand vom Saturn erfolgte, brachte Cassini in eine stark elliptische Bahn, die nach und nach durch weitere Bremsmanöver korrigiert wird (Grafik im Kasten oben). ▷

Was Cassini und Huygens erforschen sollen

Das Reiseziel der Cassini-Huygens-Mission ist einer der exotischsten Orte im Sonnensystem: ein gigantischer Gasplanet, umgeben von einem eindrucksvollen Ringsystem, ausgestattet mit einem starken Magnetfeld und umgeben von einem Schwarm eisiger Satelliten sowie einem merkurgroßen Mond. Nachfolgend einige Schwerpunkte des Forschungsprogramms.

Saturn

Durchmesser: 120536 Kilometer
Entfernung von der Sonne: 1,4 Milliarden Kilometer



NASA / JPL / SPACE SCIENCE INSTITUTE

Im Anflug: Cassini nahm dieses Bild im März 2004 auf, als das Raumfahrzeug noch 56 Millionen Kilometer vom Saturn entfernt war. Der Gasplanet besteht hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium, mit geringen Anteilen an Methan und Stickstoff. Seine Masse beträgt rund ein Drittel derjenigen von Jupiter.

Saturn strahlt eine überraschend große Menge an Wärme ab. Laborexperimente und Modellrechnungen weisen darauf hin, dass die Wärme durch Reibung entsteht, wenn Tropfen flüssigen Heliums durch den leichteren flüssigen Wasserstoff in Richtung des Planetenzentrums sinken. Wenn dies zutrifft, sollte der Heliumanteil in der Atmosphäre relativ gering sein.

Voyager 1 bestimmte die Heliumhäufigkeit indirekt mit seinem Infrarot-Spektrometer, aber das Ergebnis war nicht eindeutig. Das Infrarot-Spektrometer auf dem Cassini-Orbiter kann den Heliumanteil genauer ermitteln. Cassini wird auch die von Saturn abgestrahlte Wärme exakter messen. Diese Untersuchungen könnten zeigen, ob sich Helium und Wasserstoff in den tiefen Bereichen des Planeten wirklich trennen.



J. T.TRAUGER, NASA / JPL

Magnetosphäre

Reicht bis zu 1,5 Millionen Kilometer in Richtung Sonne und 10- bis 100-mal so weit in die Gegenrichtung

Saturns Magnetfeld ist symmetrischer aufgebaut als jenes von Jupiter und erzeugt auch ein viel schwächeres Rauschen im Radiobereich. Eine Ursache dafür könnte darin liegen, dass das Innere Saturns eine im Vergleich zu Jupiter schlechtere elektrische Leitfähigkeit aufweist.

Dennoch sind die im Magnetfeld des Gasplaneten eingefangenen Ionen energiereich genug, um die vereisten Oberflächen der Monde zu verändern, Titans Atmosphäre zu erodieren, kleine Partikel aus den Ringen herauszureißen und Polarlichter hervorzurufen (wie auf obiger Aufnahme des Hubble-Weltraumteleskops zu sehen). Cassinis Messungen werden dazu beitragen, die verschiedenen Magnetosphären im Sonnensystem – einschließlich des irdischen Magnetfelds – besser zu verstehen.



NASA / JPL / SPACE SCIENCE INSTITUTE

Ringe

Radius: von 67000 Kilometer (innerer Rand des D-Rings) bis 483000 Kilometer (äußerer Rand des E-Rings)

▷ In den folgenden Wochen fliegt Cassini zweimal an Titan vorbei, um die Atmosphäre und Oberfläche des Trabanten zu untersuchen und die Huygens-Mission vorzubereiten. Am 25. Dezember beginnt die Huygens-Sonde dann ihren 20 Tage währenden Flug zu Titan: Am 14. Januar 2005 wird sie in die bis zu 1000 Kilometer dicke Atmosphäre des Monds eintauchen (siehe Grafik im Kasten auf S. 54). Ein untertassenförmiger Hitzeschild schützt die Kapsel vor den hohen Temperaturen beim Eintritt in die Gashülle. Etwa 170 Kilometer über der Oberfläche werden sich Fallschirme öffnen, die den Abstieg verlangsamen und stabilisieren. Während Huygens durch den orangefarbenen Dunst schwebt, analysieren der Gaschromatograf und das Massenspektrometer (GCMS) die Zusammensetzung der Atmosphäre. Ein anderes Instrument sammelt und verdampft feste Partikel, damit sie ebenfalls vom GCMS identifiziert werden können. Gleichzeitig werden die Abstiegskamera und das Spektral-Radiometer (DISR) der Sonde Bilder der Methanwolken aufnehmen, damit die Wissenschaftler deren Größe und Form ermitteln können.

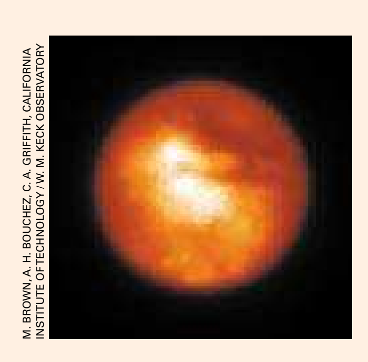
Ab einer Höhe von etwa 50 Kilometer wird das DISR mit Panorama-Aufnahmen der darunter liegenden Landschaft beginnen. Auf den letzten wenigen hundert Metern des Landeanflugs beleuchtet eine auf der Sonde montierte Weißlichtlampe die Oberfläche. Normalerweise würde diese schmutzig rot erscheinen, weil die Atmosphäre den blauen Anteil des Sonnenlichts absorbiert.

Huygens' Einsatz dauert nur knapp drei Stunden

Die Beleuchtung erlaubt es, mit dem DISR die Zusammensetzung der Oberfläche zu analysieren. Während des gesamten Abstiegs der Sonde werden die Verschiebungen ihrer Funkfrequenz registriert, um daraus Informationen über die Windstärken zu erhalten. Das Huygens Atmospheric Structure Instrument

Rillen und Speichen: Warum sind die Ringe des Saturns – hier in einer Aufnahme von Voyager 2 aus dem Jahr 1981 zu sehen – so viel dramatischer und massereicher als die der anderen Riesenplaneten im Sonnensystem? Und sind die Ringe so alt wie Saturn selbst oder nur kurzlebige Gebilde?

Cassinis Kameras und Spektrometer analysieren die Struktur der Ringe wesentlich genauer, als es frühere Raumsonden vermochten, und liefern so Hinweise auf ihre Entwicklung. Außerdem wird Cassini Funksignale durch die Ringe hindurch zur Erde senden. Daraus lassen sich Rückschlüsse auf die Eigenschaften der Ringpartikel ziehen. Das Missionsteam wird auch die elektromagnetische Anhebung des Staubs über die Ringebene genauer untersuchen – ein Effekt, der sich auf den Voyager-Aufnahmen als dunkle Streifen auf den Ringen bemerkbar machte. Diese Forschungen können Wissenschaftlern helfen, die Prozesse der Planetenbildung in den erheblich größeren Trümmerscheiben um neu entstandene Sterne zu verstehen.


M. BROWN, A. H. BOUCHEZ, C. A. GRIFFITH, CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY / W. M. KECK OBSERVATORY

Titan

Durchmesser: 5150 Kilometer
Entfernung vom Saturn: 1,2 Millionen Kilometer

Der größte Saturnmond, Titan, ist größer als der Merkur und verfügt über eine Atmosphäre, die dichter ist als jene der Erde. In seiner klimatischen und chemischen Komplexität ähnelt Titan – hier in einer Aufnahme des Keck-II-Teleskops gezeigt – unserem Heimatplaneten. Freilich ist es wegen der Oberflächentemperatur von –180 Grad Celsius äußerst unwahrscheinlich, dass dort Leben existiert.

Doch könnten durchaus gelegentlich chemische Reaktionen auf der Oberfläche stattgefunden haben – angeregt durch Wärme aus dem Innern des Monds oder durch Kometeneinschläge. Wenn große Kometen auftreffen, können sie sogar kilometergroße Seen aus flüssigem Wasser erschaffen, die unter einer dünnen Eiskruste jahrhundertelang bestehen blieben – falls Ammoniak zugegen wäre, das als Gefrierschutzmittel wirkt, sogar noch länger. Einfache Kohlenwasserstoffe und Nitrite in diesen Seen könnten sich in Aminosäuren, Purine, Zucker und andere Lebensbausteine verwandeln. Wie dies auf der Erde vonstatten ging, lässt sich nicht mehr in Erfahrung bringen, da die Hinweise darauf durch das Leben selbst zerstört wurden.

Doch auf Titans Oberfläche sind die Merkmale solcher urzeitlichen Reaktionen möglicherweise erhalten geblieben. Cassinis Kameras und Spektrometer forschen deshalb nach organischen Substanzen und nach Variationen in ihren Ablagerungen.


NASA / JPL

Die Eissatelliten

Durchmesser: 20 Kilometer (Pan, der kleinste vermessene Mond) bis 1528 Kilometer (Rhea, der zweitgrößte Trabant)
Abstand vom Saturn: 134000 Kilometer (Pan) bis 23 Millionen Kilometer (Ymir)

Mit Ausnahme von Titan sind Saturns Monde alle kleiner als die Galileischen Monde Jupiters. Ihr Aussehen ist sehr unterschiedlich. Die Oberfläche von Enceladus (hier auf einer Aufnahme von Voyager 2 zu sehen) ist sehr glatt, was darauf schließen lässt, dass sie in jüngster Vergangenheit umgestaltet wurde. Ein solches Phänomen tritt gewöhnlich nur bei Himmelskörpern wesentlich größerer Masse auf. Im Gegensatz dazu zeigt Iapetus eine zweigesichtige Oberfläche: die Seite des Monds, die in seine Flugrichtung weist, ist wesentlich dunkler als die andere.

Um Licht in diese Geheimnisse zu bringen, wird Cassini mehrere der Satelliten aus der Nähe fotografieren und mit seinen Messinstrumenten untersuchen.

(HASI) wird die Temperatur, den Druck und die elektrischen Felder messen, die das Vorkommen von Blitzen anzeigen. Der gesamte Landevorgang wird zwischen zweieinhalb und drei Stunden dauern.

Wenngleich das Hauptziel der Huygens-Sonde die Untersuchung von Titans Atmosphäre ist und keine Vorkehrungen für eine sichere Landung getroffen wurden (was zu teuer gewesen wäre), sind die Wissenschaftler stark an der Oberfläche des Saturnmonds interessiert. Ist sie mit flüssigen Kohlenwasserstoffen bedeckt? Zeigt sie Anzeichen geologischer Aktivität oder organisch-chemischer Evolution? Oder ist Titan nur ein von Eis überzogener Trabant, dessen Oberfläche mit Kratern übersät ist? Um diese Fragen zu klären, führt die Sonde ein Surface Science Package (SSP) mit sich, das während der Endphase der Landung Schallwellen aussenden wird, um die Rauigkeit der Oberfläche zu ermitteln. HASI wird ähnliche Messungen mit seinem Radar durchführen. Beim Aufprall, der mit der relativ gemächlichen Geschwindigkeit von einigen Metern pro Sekunde erfolgt, werden die Daten der Beschleunigungssensoren an Bord der Sonde sehr schnell durch das SSP weitergeleitet.

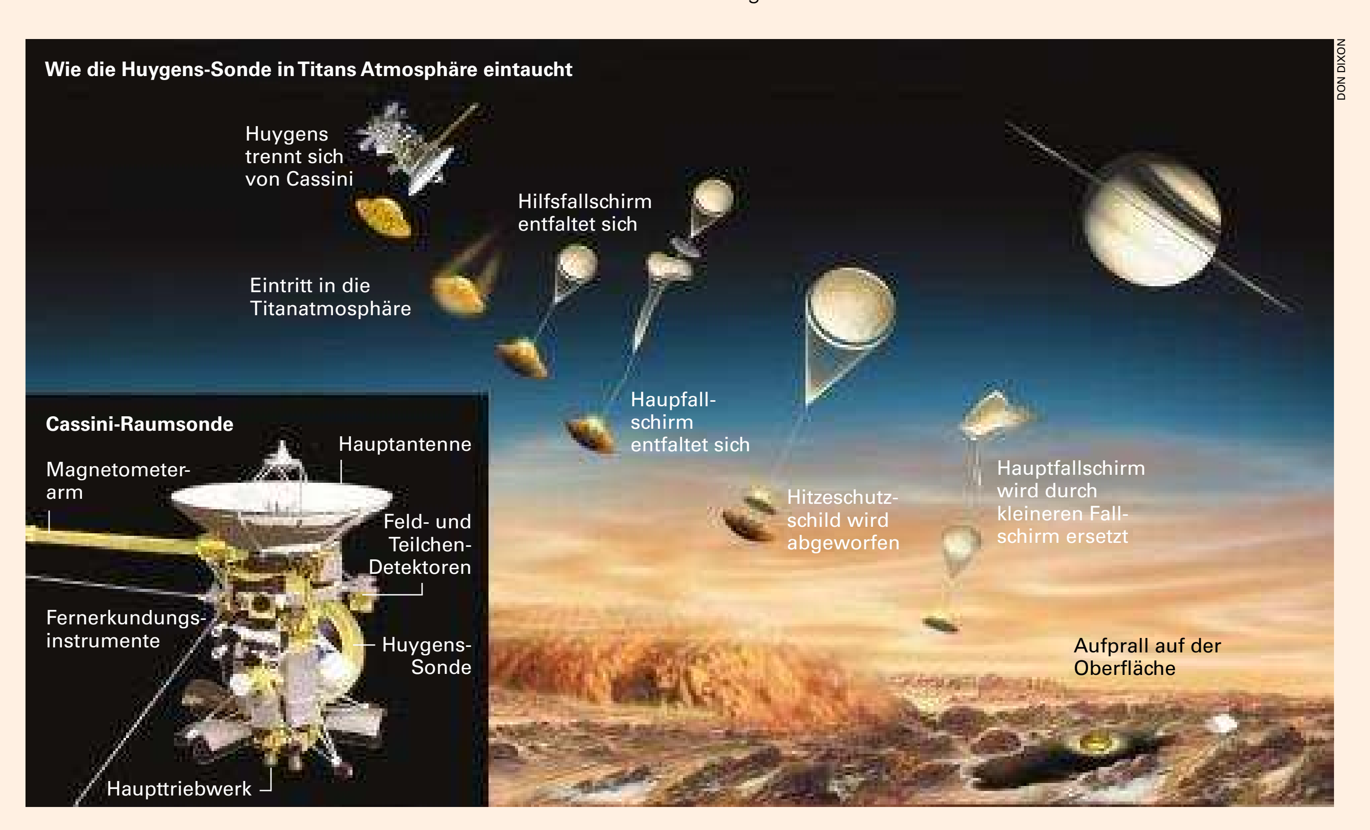
Damit soll festgestellt werden, ob der Untergrund hart, schneebedeckt oder flüssig ist. Sollte die Sonde die Landung überstehen, können für weitere drei bis dreißig Minuten Messwerte zum Orbiter übertragen werden, bevor er hinter dem Horizont verschwindet. Falls Huygens in einem Kohlenwasserstoff-See oder in einem Ozean niedergeht, kann das SSP Temperatur, Dichte und andere Charakteristika des »Gewässers« messen. Die Sensoren können auch die Schallgeschwindigkeit in der Flüssigkeit bestimmen und vielleicht auch deren Tiefe ausloten. In der Zwischenzeit wird das DISR Aufnahmen machen und das GCMS wird versuchen, die Kohlenwasserstoffe zu analysieren. Die Huygens-Sonde ist so gebaut, dass sie in Kohlenwasserstoffen ▷

Kundschafter auf Titan

Am 25. Dezember wird der Cassini-Orbiter die 320 Kilogramm schwere Huygens-Sonde freisetzen, die dann am 14. Januar 2005 mit einer Geschwindigkeit von 20000 Kilometer pro Stunde in Titans Atmosphäre eintauchen wird. Etwa 170 Kilometer über der Oberfläche bremsen Fallschirme die Geschwindigkeit ab, und der Hitzeschild wird abgeworfen. Erst dann können die wissenschaftlichen Instrumente an Bord der Kapsel Atmosphäre und Oberfläche des Monds untersuchen. Die Sonde sendet die Daten zum Cassini-Orbiter, der sie dann zur Erde weiterleitet.

Auch der Cassini-Orbiter (kleines Bild) wird bei einigen Vorbeiflügen den Saturnmond Titan untersuchen. Eine Palette des Orbiters enthält zwei Kameras und mehrere Spektrometer. Auf einer zweiten Palette untergebrachte Instrumente untersuchen Saturns Magnetosphäre, also die Region, die vom Magnetfeld des Planeten beherrscht wird, sowie geladene Teilchen, die durch das Feld wirbeln. Andere Geräte messen Staubströme und analysieren Partikel, die schnelle Ionen aus den Eismonden herausschlagen. Zudem untersuchen sie die obersten Schichten der Titanatmosphäre, wenn Cassini in 1000 Kilometer Höhe über die Mondoberfläche jagt. Ein Magnetometer, das an einem 11 Meter langen Ausleger montiert ist, wird Stärke und Form von Saturns Magnetfeld ermitteln.

Cassinis vier Meter große Antenne dient nicht nur der Datenübertragung, sondern wird auch als Radar eingesetzt. Die Antenne strahlt Radioimpulse ab und registriert die Echos, die von festen Körpern reflektiert werden. Daraus lassen sich Form und Rauigkeit der Oberfläche ableiten. Zusätzlich wird die Mikrowellenstrahlung Titans gemessen, aus der sich die Temperatur seiner Oberfläche und seiner Atmosphäre ermitteln lässt. Schließlich können mit der Antenne die Atmosphären Saturns und Titans untersucht werden, indem Radiosignale durch sie in Richtung Erde gesendet werden.



DON DIXON

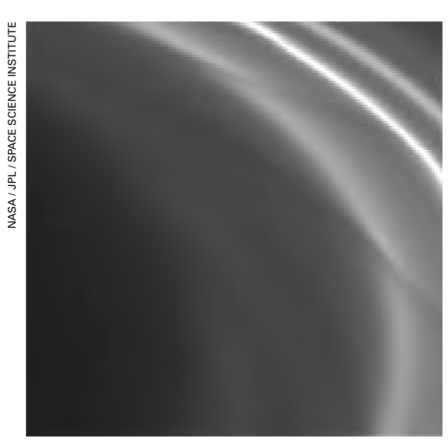
▷ schwimmt, obwohl die Dichte dieser Substanzen kleiner als die von Wasser ist.

Nach Huygens' Landung wird der Cassini-Orbiter auf seinem vierjährigen Flug durch das Saturnsystem den Trabanten Titan weiter untersuchen. Die meisten der geplanten 76 Saturn-Umkreisungen führen Cassini wieder nahe an dem größten Mond vorbei. Jede Begegnung wird auch Cassinis Umlaufbahn verändern, sodass das Raumfahrzeug auch Nahaufnahmen von Saturns anderen Satelliten und seinen Ringen machen sowie andere Regionen der Magnetosphäre untersuchen kann. Im Gegensatz zu Galileo und Voyager besitzt Cassini keine drehbare Plattform, mit der sich die Instrumente ausrichten ließen: Um die Entwicklungskosten zu verringern, wurden die Geräte starr am zylindrischen Körper des Satelliten befestigt. Deshalb müssen die an der Mission beteiligten Wissenschaftler ihre Beobachtungen sorgfältig planen, damit die Instrumente in der optimalen Reihenfolge eingesetzt werden können.

Die vielfältigen wissenschaftlichen Experimente, die im Saturnsystem durchgeführt werden sollen, können hier nur angerissen werden (siehe Kasten auf der vorherigen Doppelseite). Mein eigenes Interesse gilt Titan. Neben der Frage, ob sich auf seiner Oberfläche komplexe organische Moleküle entwickelt haben, wollen die Forscher noch viel mehr über diese Welt herausfinden. Auf der Erde ist

Direkt nach dem Einschuss in die Umlaufbahn fotografierte Cassini die Saturnringe in bisher unerreichter Detailfülle. Der 325 Kilometer breiten Encke-Teilung im A-Ring verleiht ein schmaler Ring in der Mitte das Aussehen einer Straße. Die Wellen am inneren Rand der Lücke werden durch den Mond Pan verursacht, der den Saturn in der Encke-Teilung umrundet (rechts). Der Mond Prometheus wiederum erzeugt die bänderartigen »Verwehungen« im weiter außen gelegenen F-Ring (ganz rechts).





NASA / JPL / SPACE SCIENCE INSTITUTE

Wasser verantwortlich für die ständige Umgestaltung der Oberfläche und den Energieaustausch zwischen ihr und der Atmosphäre. Auf Titan übernimmt Methan diese Rolle. Aber da diese Substanz in der Atmosphäre des Saturnmonds durch photochemische Reaktionen abgebaut wird, muss sie fortlaufend nachgeliefert werden – entweder von der Oberfläche, aus dem Inneren oder durch Kometeneinschläge.

Gibt es auf Titan Seen aus Kohlenwasserstoffen?

Die gegenwärtige Methanhäufigkeit auf Titan, wie sie Voyager gemessen hatte, scheint bei einem kritischen Wert zu liegen – gerade genug, um Wolken und Regen aus diesem einfachsten Kohlenwasserstoff zu ermöglichen. Aber die Konzentration ist zu niedrig, als dass reines, flüssiges Methan auf der Oberfläche vorkommen könnte: Methantropfen würden verdunsten, bevor sie die Oberfläche erreichten.

Falls es auf Titan Seen gäbe, bestünden sie höchstwahrscheinlich aus flüssigem Ethan – das durch photochemische Reaktionen in der Atmosphäre des Monds entsteht –, in dem gewisse Mengen Methan gelöst sind.

Woher kommt das Methan und wohin gehen seine photochemischen Reaktionsprodukte? Diese Frage gehört zu den wichtigsten, welche die Cassini-Huygens-Mission beantworten soll. Sind Methan und Ethan in Seen oder Meeren aus Kohlenwasserstoffen auf Titans Oberfläche vermischt? Neueste Daten des Arecibo-Radioteleskops in Puerto Rico scheinen darauf hinzuweisen. Aber nur der Cassini-Orbiter und die Huygens-Sonde können die Antwort liefern.

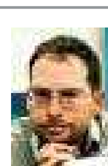
Falls das Raumschiff keine Anzeichen für Seen oder Meere findet, dann hatte Titan in seiner Vergangenheit wahrscheinlich nie genug Methan oder Ethan besessen, um solche Gewässer bilden zu können. Dann wäre die momentane Charakteristik der Titanatmosphäre – in der das Methan einen Treibhauseffekt hervorruft – wahrscheinlich nur ein Zufallsergebnis, hervorgerufen durch einen kürzlich stattgefundenen Kometeneinschlag oder einen Ausbruch aus dem Mondinneren. Letztlich wollen die Planetenforscher herausfinden, woher Titans Gashülle stammt und warum er der einzige Mond im Sonnensystem ist, der eine dichte Atmosphäre besitzt.

Alle Bordinstrumente werden notwendig sein, um die Antworten auf diese Fragen zu finden. Kameras, Spektrometer und das Radar des Orbiters, welches durch Titans dichten Dunst hindurchschauen kann, werden nach Meeren aus Kohlenwasserstoffen suchen, wenn sie die Mondoberfläche kartieren.

Andere Instrumente untersuchen die Wechselwirkung von Titans Atmosphäre mit geladenen Teilchen in Saturns Magnetfeld. Radiosignale, die durch die Atmosphäre des Monds geschickt werden, zeigen, wie die Temperatur abhängig von Länge und Breite variiert. Durch Kombinieren dieser Ergebnisse mit den Bildern des Orbiters und der Huygens-Sonde kann das Ausmaß des Methanniederschlags bestimmt werden. Zusammen mit Bildern der Methanwolken wird die Sonde auch direkte Temperatur- und Druckwerte liefern. Hinweise auf mögliche Quellen für Methan und Stickstoff auf diesem Mond könnten sich aus zwei atmosphärischen Schlüsselparametern ergeben: der Häufigkeit der Methanmoleküle, die das Wasserstoffisotop Deuterium enthalten, und den Verhältnissen zwischen Stickstoff und den Edelgasen Argon und Krypton.

Nach Cassinis erstem Vorbeiflug an Titan und nach der Landung der Huygens-Sonde wird über die Planetenforscher wohl eine Flut von Entdeckungen hereinbrechen. Und der Strom neuer Erkenntnisse wird nicht versiegen, wenn der Orbiter weiter den Riesenmond beobachtet. Dennoch wird auch die Cassini-Huygens-Mission nicht alle noch offenen Fragen beantworten können. Vielleicht denken die Forscher bald über Ballone, Luftschiffe und Landegeräte nach, mit denen sie Titans dichte Atmosphäre näher untersuchen wollen. Vermutlich wird die lange Entdeckungsreise, die mit Cassini-Huygens begann, noch nicht so schnell enden. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Jonathan I. Lunine ist Professor für Planetenkunde und Physik sowie Leiter des Programms für Theoretische Astrophysik an der Universität von Arizona. Er forscht über die Entstehung und Entwicklung der Planeten und des Sonnensystems. Zudem interessiert er sich für die Prozesse, die zu bewohnbaren Welten führen. An der Cassini-Huygens-Mission arbeitet er als interdisziplinärer Wissenschaftler mit.

Passage to a ringed world: the Cassini-Huygens mission to Saturn and Titan. Von Linda J. Spilker (Hg.). Nasa, 1997

Titan: the Earth-like moon. Von Athena Coustenis und Fred Taylor. World Scientific Publishing, 1999

Lifting Titan's veil: exploring the giant moon of Saturn. Von Ralph Lorenz und Jacqueline Mitton. Cambridge University Press, 2002

Mission to Saturn: Cassini and the Huygens probe. Von David M. Harland. Springer-Verlag, 2002

The Cassini-Huygens mission: overview, objectives and Huygens instrumentarium. Von Christopher T. Russel (Hg.). Kluwer Academic Publishers, 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

WISSENSCHAFT IM RÜCKBLICK



Einweisungsgerät für Flugzeuge

Vom Amerikaner Bejamin Greene jr. et al. wurde vor kurzem ein völlig neuartiges, halbautomatisches Lande-Einweisungsgerät für Flugzeuge entwickelt … Es ist damit jetzt möglich, alle 30 Sekunden (!) ein Flugzeug landen zu lassen … »Volscan« arbeitet nach dem Funkmeßprinzip – also mit Radar – und hat eine Reichweite von radial 100 km. Es ermittelt in seinen Zusatzaggregaten die genauen Höhen-, Seiten- und Kurswerte anfliegender Flugzeuge. Sobald das Radargerät ein Flugzeug auffaßt, erscheint auf dem Bildschirm … ein wandernder Lichtpunkt, das Radarecho. Diesen Punkt erfaßt der Bedienungsmann mit einem neuartigen Gerät (s. Abb.), dem sogenannten Kurs- und Geschwindigkeitsnehmer; er verfolgt ihn damit. *(Industriekurier, Wochenausgabe Technik und Forschung, 7. Jg., Nr. 116, S. 267, August 1954)*



▶ Mit der Pistole wird ein Lichtpunkt auf dem Bildschirm verfolgt – so werden Geschwindigkeit und Kurs eines Flugzeugs gemessen.

Gelöstes Sonnenrätsel

Die letzte unbekannte Linie im Spektrum der Sonnenkorona konnte jetzt identifiziert werden. 1869 hatten Astrophysiker die Emissions-Linien entdeckt. 1940 konnte der Physiker Bengt Edlén nachweisen, daß diese von gewöhnlichen Elementen stammen … Er konnte die meisten Linien identifizieren, bis auf eine gelbe, die durch Kalzium hätte hervorgerufen sein können, wenn sie eine Begleitlinie gehabt hätte, die man aber nicht finden konnte. Nun konnte man am »High-Altitude«-Observatorium in Colorado beweisen, daß die Linie tatsächlich von Kalzium stammt, die Begleitlinie aber fehlen muß, weil sie mit einer Absorptionsbande zusammenfällt und ausgelöscht wird. *(Die Neue Zeitung, 10. Jg., Nr. 188, S. 17, August 1954)*

Mistkäfer-Orientierung im polarisierten Licht

Die gleiche Fähigkeit, die schon bei Bienen, Ameisen und einer Krebsart nachgewiesen wurde, konnte Birukow kürzlich auch dem Mistkäfer … zuschreiben. Dieser vermag die Polarisation des Lichtes zu erkennen. Überträgt man einen Käfer, der bei freiem Ausblick auf die Sonne einen bestimmten Kurs nach dieser gelaufen war, in einen innen schwarzen, nur nach oben offenen Zylinder, behält das Tier die Richtung bei, obwohl es die Sonne nicht mehr sehen kann. Voraussetzung ist, daß der blaue Himmel sichtbar ist … Daß die Orientierung tatsächlich nach der Polarisation des Himmelslichtes erfolgt, erweisen Versuche, bei denen der Zylinder samt Käfer gedreht wird: Das Tier korrigiert seine Richtung um den entsprechenden Winkel. *(Die Umschau, 54. Jg., Heft 15, S. 472, August 1954)*

Sterne und ihre Temperatur

Erst 1892 gelang es, mit der Photographie die Kenntnis von der Sterntemperatur … dahingehend zu erweitern, dass durch Temperatursteigerung das Spektrum eine Erweiterung nach dem ultravioletten Ende, durch Erniedrigung der Temperatur eine Verkürzung dortselbst erfahre. Doch … machte sich die Absorption der ultravioletten Strahlen im Glase der verwendeten Apparate störend bemerkbar. Erst die jüngsten Aufnahmen, bei denen statt Glas Quarz zur Verwendung kam …, lieferten korrekte Ergebnisse … Bei den Spektren der kälteren Sterne wiegen die Emissionen im Rot, bei den heisseren im Ultraviolett vor. *(Die Umschau, 8. Jg., Nr. 32, S. 636, August 1904)*

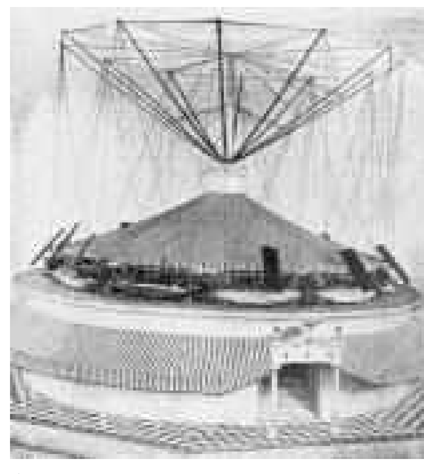
Biegsame Wellen zur Abflußreinigung

Jeder, der die unangenehme … Arbeit kennt, die mit dem Reinigen von Rohren verbunden ist … wird schon das Bedürfnis nach einem guten Hilfsmittel … empfunden haben. Die biegsamen Wellen, aus zwei eng nebeneinander gewundenen Gußstahl-Spiraldrähten … sind vorzüglich zum Reinigen von Kanälen und Röhren zu verwenden, da sie bequem auch scharfen Biegungen folgen … Sie können am Ende mit einer Drahtbürste versehen werden … Zur Beseitigung festsitzender Hindernisse kann man das Ende auch mit einer dreifachen Klaue versehen, die in das Hindernis eingeschraubt wird, und ist alsdann das Herausziehen des letzteren leicht und unfehlbar sicher. *(Zeitschrift für Bauhandwerker, 48. Jg., Nr. 15, S. 120, August 1904)*

Karussell mit Flugmaschinen



Die lenkbare Luftschiffahrt nimmt für das Publikum jetzt eine andere Stellung ein als noch zur Zeit Lilienthals. Ihr Entwicklungsgang führt … jetzt auch zum »Appell ans Publikum«. So hat H. Maxims Flugmaschinenkarussell in London bereits im »Greater New York« sein Gegenstück gefunden; auf dem »Riesenjuxplatz« Luna Park am Badestrand von Coney Island befindet sich ein Ballonkarussell. In dem Vergnügungslokal »Dreamland« ebendort wird aber schon Ernsteres geboten: Santos Dumonts kleines, aber wohlgelungenes Luftschiff Nr. 9 ist dort zur Besichtigung ausgestellt und wird allen Neugierigen aufs eingehendste erklärt … Zur weiteren Erziehung des Publikums sind Modelle fast aller je versuchten lenkbaren Ballons und Flugmaschinen … ausgestellt. *(Illustrierte Aëronautische Mitteilungen, 8. Jg., Heft 8, S. 33, August 1904)*



▲ Modell von H. Maxims Karussell

Die Krux mit dem Sex

Fast jede Spezies – unsere eigene eingeschlossen – praktiziert Sex und möchte ihn auch keinesfalls missen, und das, obwohl es viel effizientere Wege gibt, sich fortzupflanzen. Wofür ist dann Sex eigentlich da?

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Etliche Arten von Rädertieren gedeihen seit 70 Millionen Jahren ohne Sex. Die strikte Abstinenz stellt Biologen vor ein Rätsel.

Von Christopher Wills

Als Anton van Leeuwenhoek, der berühmte Mikroskopbauer des 17. Jahrhunderts, einen Tropfen Teichwasser mit seinem Instrument untersuchte, da sah er als erster Mensch so genannte Rädertiere: winzige Geschöpfe mit einem Kranz langer »Wimpern« um das Mundfeld, die in einer Weise schlagen, dass man ein drehendes Rad zu sehen meint. Ihre Schönheit und Eleganz faszinierten den Naturforscher. Was er indes nicht ahnen konnte: Einige Arten von Rotiferen – so der Fachname – halten den Weltrekord in sexueller Abstinenz. Sie unterliegen seit 70 Millionen Jahren einem strengen Zölibat – sogar aus der Sicht der frommsten Mönche Respekt einflößend.

Die ausdauernde Keuschheit solcher Rotiferen ist freilich mehr als eine Kuriosität, sie stellt die Biologen vor ein großes Rätsel. Denn Sex scheint für das langfristige Überleben wichtig zu sein: Arten, die keinen Geschlechtsverkehr mehr praktizieren, verschwinden gewöhnlich innerhalb einiger hunderttausend Jahre. Die Standarderklärung hierfür lautet, dass so genannte genetische Rekombinationen – das neue Mischen der genetischen Karten mit jeder Generation – unerlässlich seien, um die Auswirkung gefährlicher Mutationen zu mindern und neue Genkombinationen zu ermöglichen. Aber die lang anhaltende Abstinenz von Rädertieren lässt vermuten, dass an dieser Sichtweise irgendetwas nicht stimmen kann. Trotz ihrer Enthaltsamkeit floriert die Gruppe: Weltweit gibt es über 300 asexuelle Rotiferen-Arten.

Aber wenn Sex nicht unbedingt nötig ist, warum gibt es ihn dann? Zu dieser Frage – einer der heikelsten in der Biologie – kursieren über dreißig Hypothesen, darunter auch die erwähnte Standarderklärung. Die meisten allerdings sind experimentell nur dürftig belegt, und keine konnte bislang befriedigen.

In den letzten Jahren jedoch machten sich Experimentatoren wie ich daran, den Vorsprung der Theoretiker einzuholen. Wir überprüfen die bestehenden Theorien an natürlichen und künstlichen Populationen, die sich sowohl aus sexuellen als auch aus asexuellen Stämmen einer Art zusammensetzen oder aus Individuen, die zwischen beiden Vermehrungstypen wechseln. Die sich abzeichnenden Ergebnisse bestätigen, was die Theoretiker lange vermuteten – dass nämlich ein empfindliches Gleichgewicht zwischen sexueller und asexueller Fortpflanzung besteht und dass geeignete Bedingungen es in die eine oder andere Richtung auszulenken vermögen.

Je mehr man über Sex nachdenkt, desto mehr Fragen tauchen auf. Die genetische Rekombination mag in der Tat neue Genkombinationen ermöglichen, aber was, wenn die anfängliche Mischung hervorragend ist? Warum sie verändern und eine Menge schlechterer Nachkommen produzieren? Und das ist nicht alles; denn sexuelle Organismen haben noch einen anderen, fast erdrückenden Nachteil: Sie produzieren Männer.

Es fällt mir schwer, das zu sagen, aber wir Männer sind für die meisten Dinge wirklich nicht besonders viel nütze. Stellen Sie sich eine Population von Tieren vor, von denen einige sich sexuell, andere hingegen asexuell vermehren. Jedes Individuum soll genau zwei Nachkommen produzieren. In dieser Situation besitzen die asexuellen Artgenossen einen klaren Vorteil. Denn die Sexuellen müssen sich paarweise zusammentun, um gemeinsam zwei Nachkommen zu haben. Die Kopfstärke jeder Generation bleibt daher gleich. Die Zahl

der Asexuellen hingegen verdoppelt sich in der ersten Nachkommengeneration, vervierfacht sich in der zweiten und so fort. Die Asexuellen sollten demnach jeden Ressourcenwettstreit mit links gewinnen.

Den numerischen Nachteil, den sexuelle Tiere im Konkurrenzkampf mit gleichwertigen asexuellen Tieren haben, nennen Fachleute die doppelten Kosten von Sex. Wenn ein Lebewesen einer sich sexuell vermehrenden Art eine Mutation erwirbt, die zur Asexualität führt, dann sollten seine Nachkommen einen klaren Fortpflanzungsvorteil haben, den Ressourcenwettstreit für sich entscheiden und die sexuellen Artgenossen ins Abseits drängen. Sex erscheint so gesehen als Verlierer-Strategie.

Unter diesem Blickwinkel wäre verständlich, wieso etliche Rotiferen dem Sex entsagt haben. Wenn ihre »Stammmutter« über gute genetische Voraussetzungen verfügte, dann konnten ihre Nachkommen prächtig gedeihen. Leider hat jedoch auch die asexuelle Strategie einen Haken. Auf lange Sicht ist sie nicht das Gelbe vom Ei. Eine Genkombination, die vor 70 Millionen Jahren hervorragend war, wird es heute höchstwahrscheinlich nicht mehr sein, denn die Welt hat sich seither beträchtlich verändert. Für die Rotiferen bestand die einzige Chance, sich anzupassen, in der Anreicherung von Mutationen. Die geht aber nur langsam vonstatten, was wohl der Grund dafür ist, dass die meisten asexuellen Spezies – in evolutionären Zeiträumen gemessen fast augenblicklich – wieder ausstarben.

Doppelte Kosten aufwiegen

Genau das ist das Problem der Theoretiker. Einerseits muss Sex Vorteile haben, sonst wäre er nicht so weit verbreitet. Andererseits sollte Asexualität auf kurze Zeit immer gewinnen – und gleichzeitig langfristiges Überleben nicht unbedingt ausschließen, wie das Beispiel der Rotiferen zeigt.

Mehrere natürliche Systeme haben sich bei dem Versuch, dieses Paradoxon aufzulösen, als nützliches Testmodell erwiesen. Dazu gehört eine Gruppe von 21 eng verwandten Süßwasserfisch-Arten der Gattung Jungfernkärpflinge *(Poeciliopsis)*, die in Mexiko und im Südwesten der Vereinigten Staaten leben. Robert Vrijenhoek von der Rutgers-Universität in New Jersey hat diese Fische einige Jahre lang beobachtet. Er konnte ein komplexes Wechselspiel zwischen ihnen feststellen, das eindrucksvoll veranschaulicht, wie empfindlich die Balance zwischen den Vorteilen sexueller und asexueller Reproduktion ist.

Vrijenhoek entdeckte, dass die Fische in dieser Gruppe auf ungewöhnlich einfache Weise von sexueller zu asexueller Fortpflanzung übergehen. Viele asexuelle Spezies erwiesen sich schlicht als ein »Kreuzungsprodukt« zweier sexueller Spezies, das sich asexuell fortpflanzen kann. Sie sind in Teichen und Wasserläufen oft anzutreffen. Ihr Erscheinen und Verschwinden sollte etwas darüber aussagen, wo sich die unterschiedlichen Fortpflanzungsstrategien auszahlen.

Wie Vrijenhoek feststellte, dominieren die asexuellen Jungfernkärpflinge oft in extremen Umgebungen, zum Beispiel in Teichen mit hoher Wassertemperatur. Der Grund: Alle Nachkommen eines asexuellen, temperaturtoleranten Individuums verfügen über die gleiche Genkombination wie es selbst und können somit in der extremen Umgebung überleben. Ein sexueller Fisch, der zufällig der hohen Temperatur standhält, wird hingegen hauptsächlich Nachkommen hervorbringen, die nicht so gut angepasst sind, da sie über andere Genkombinationen verfügen als er.

Nichtsdestotrotz überdauern sexuelle Populationen. Die Vorzüge ihrer Fortpflanzung müssen beträchtlich sein, um deren doppelte Kosten zu kompensieren. Ein möglicher Vorteil besteht darin, dass sexuelle Fische in wechselnden Umgebungen überleben können. Wo Wasserläufe in ihrer Temperatur und Fließgeschwindigkeit jahreszeitlich stark schwanken, dominieren sexuelle Spezies von Jungfernkärpflingen. Liegt hier das Geheimnis? ▷

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

▲ Wenn Lotosblumen im Nildelta auf landwirtschaftliche Flächen übergreifen, setzen sie verstärkt auf ungeschlechtliche Vermehrung.

Im Sommer, bei guten Bedingungen, pflanzen sich Wasserflöhe durch Jungfernzeugung fort. Erst zum Herbst hin vermehren sie sich geschlechtlich.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Das Auftreten von Asexualität bei Tieren führt gewöhnlich in eine Einbahnstraße: Vrijenhoeks asexuelle Fische können ihre Geschlechtlichkeit nie wieder erlangen. Viele Pflanzen vermögen jedoch zweigleisig zu fahren, was einiges darüber verrät, wann sich welche der beiden Strategien eher auszahlt. Ein Beispiel sind ägyptische Lotosblumen *(Nympaea lotus)*, die wild im Nildelta wuchern. Der biologische Erfolg dieser Seerosen lässt sich zum Teil darauf zurückführen, dass sie sich – wie viele andere Pflanzen – sexuell und asexuell vermehren. Eine Lotosblume kann nämlich sowohl Samen ausstreuen als auch unterirdische Ausläufer in jede Richtung aussenden. Ableger, die genetisch identisch mit ihrer Mutterpflanze sind, somit Klone darstellen, entwickeln sich überall dort, wo die »Stolonen« genannten Ausläufer die Oberfläche erreichen.

Ahmed Hegazy und seine Kollegen von der Universität Kairo fanden heraus, dass in natürlichem Sumpfland, in dem die Lotosblumen normalerweise wachsen, drei Viertel aller neuen Pflanzen aus solchen Ausläufern hervorgehen. Wenn das Gewächs jedoch auf bewirtschaftete Flächen vordringt, erreichen Pflanzen aus Stolonen sogar ein Verhältnis von zehn zu eins gegenüber solchen aus Samen. Angesichts neuer Möglichkeiten in einer anderen Umwelt wird auf schnelle Reproduktion und mithin auf Asexualität umgeschaltet.

Sex ist für Wasserflöhe günstig

Viele »Unkräuter« verfolgen ähnliche Strategien. Bei ihnen hängt die Balance zwischen asexueller und sexueller Vermehrung demnach von der Umgebung ab. Asexuelle Spezies scheinen einen Vorteil zu haben, wenn die Bedingungen konstant oder wenigstens von einer Generation zur nächsten vorhersagbar bleiben. Sexuelle Arten hingegen mögen mit unvorhersehbar wechselnden Bedingungen besser zurechtkommen. Was aber verschafft ihnen mehr Vorteile: räumliche Vielfalt oder zeitliche Veränderungen?

Im letzten Kapitel seines Buches »Über die Entstehung der Arten« schildert Charles Darwin sehr poetisch, wie komplex die meisten natürlichen Umgebungen sind: »Wie anziehend ist es, ein mit verschiedenen Pflanzen bedecktes Stückchen Land zu betrachten, mit singenden Vögeln in den Büschen, mit zahlreichen Insekten, die durch die Luft schwirren, mit Würmern, die über den feuchten Erdboden kriechen ...« Er fährt fort mit dem Anspruch, dass seine Theorie der Evolution solche Komplexität erklären könne.

Heute nutzen Biologen die Idee der Umweltkomplexität, um die Funktion von Sex zu erklären. Aus den darauf fußenden Theorien folgt, dass räumlich komplexe Lebensräume der sexuellen Fortpflanzung einen Vorteil verschaffen. Denn die Nachkommen sexueller Organismen sind untereinander verschieden: Wie zahlreich sie auch sein mögen, irgendwo findet eigentlich jeder von ihnen ein Plätzchen zum Leben. Asexuelle Organismen hingegen produzieren nur Nachkommen, die mit ihnen selbst identisch sind, deshalb müssen die meisten von ihnen jene wenigen Plätze bevölkern, an denen die passenden Lebensbedingungen vorliegen. Mithin bleiben ihnen viele Lebensräume verwehrt, die von sexuellen Nachkommen noch besiedelt werden können. Der numerische Vorteil asexueller Fortpflanzung schwindet dadurch.

Eine wirklich schöne These – doch leider gibt es nur wenige experimentelle Belege dafür. Im Jahre 1987 untersuchten Graham Bell von der McGill-Universität in Montreal und sein Kollege Austin Burt, inzwischen am Imperial College in London, wie oft durch so genanntes Crossing-over genetisches Material zwischen Chromosomen von Säugetieren ausgetauscht wird, wenn Geschlechtszellen entstehen. Dabei verglichen sie vermehrungsfreudige Arten mit solchen, die wenige Nachkommen hervorbringen – beispielsweise Nagetiere mit Primaten. Die Forscher vermuteten, dass die Austauschhäufigkeit bei Tieren mit großen Würfen ausgeprägter sein müsse. Denn nur dann sei gewährleistet, dass die zahlreichen Nachkommen untereinander verschieden genug wären, um in ihrer komplexen Umgebung allesamt einen Platz zum Leben zu finden. Indes, Burt und Bell konnten keinen solchen Trend feststellen.

Es ist demnach wohl nicht die räumliche Vielfalt eines Lebensraums, die Sex vorteilhaft macht. Ist es vielleicht die Unvorhersehbarkeit zeitlicher Abläufe? Einige Organismen, darunter verschiedene Spezies von Wasserflöhen der Gattung *Daphnia*, pflanzen sich während des Sommers asexuell fort, wenn das Leben einfach ist. Doch zum Herbst hin produzieren sie neben weiblichen auch männliche Nachkommen, die sich miteinander paaren. Einige ihrer Eier überleben den Winter, und im darauf folgenden Frühling schlüpft eine Vielzahl genetisch unterschiedlicher Individuen.

Mag sein, sexuelle Fortpflanzung ist deshalb vorteilhaft, weil sich Umweltbedingungen von Jahr zu Jahr unvorhersehbar ändern – doch meist tun sie das eigentlich nicht: Die Jahreszeiten folgen vielmehr gewöhnlich in vorhersagbarer Weise aufeinander. Die sexuelle Vermehrung ist für den Wasserfloh wohl eher deshalb günstig, weil die sexuelle »Neumischung« ein breites Spektrum unterschiedlicher Eier hervorbringt: Einige von ihnen über-

leben den Winter immer – obwohl *Daphnia* eigentlich auf schnelles Wachstum und schnelle Vermehrung in einem warmen Milieu zugeschnitten ist. Ähnlich wie die Lotosblume profitiert der Wasserfloh vom Wechsel zwischen sexueller und asexueller Fortpflanzung.

Der Schlüssel für den mysteriösen Vorteil von Sex könnte dennoch in der Unvorhersagbarkeit künftiger Umweltbedingungen liegen. Neuere Experimente untermauern diese These. Veena Prahlad und Elizabeth Goodwin von der Universität von Wisconsin in Madison sowie Dave Pilgrim vom kanadischen Biological Sciences Centre in Alberta untersuchten kürzlich Fadenwürmer der Art *Caenorhabditis elegans*. Statt Weibchen gibt es hier Zwitter, die sich »asexuell« oder sexuell fortpflanzen. Wie die Forscher feststellten, können sich die sexuell gezeugten Nachkommen leichter an veränderte Umweltbedingungen anpassen und dabei ihr Geschlecht ändern.



Harter Wettlauf zwischen Mensch und Mikrobe

Eine der Hauptquellen für die Unvorhersehbarkeit liegt in Krankheiten – auch beim Menschen. Der kürzlich verstorbene englische Evolutionsbiologe William Hamilton vermutete, dass wir gezwungen sind, eine variable Nachkommenschaft zu zeugen, weil unsere Krankheitserreger sich stets weiterentwickeln: Sollte plötzlich ein tödliches Virus auftauchen, ist die Chance größer, dass wenigstens einige aus der Schar der Sprösslinge resistent genug sind, um das reproduktive Alter zu erreichen. Umweltveränderungen in diesem Sinne sind tatsächlich nicht vorhersehbar und könnten Sex den entscheidenden Vorteil verschaffen. Hamilton zufolge befinden wir uns in einem verbissenen Wettlauf mit vielen Krankheitserregern. Gibt es Beweise dafür?

Es scheint so. Daten aus dem Human-Genom-Projekt zeigen, dass jene Gene, die für unser Immunsystem verantwortlich zeichnen, sich schneller entwickeln als andere Erbfaktoren – vermutlich weil sie im Wettstreit mit den Bakterien und Viren liegen, die uns attackieren. Burt und Bell stellten fest, dass bei langlebigen Säugern wie Primaten die Austauschhäufigkeit durch Crossing-over höher ist als bei kurzlebigen wie etwa Lemmingen. Der Grund könnte sein, dass die langlebigen während ihrer Lebensdauer mit einer größeren Bandbreite von Keimen in Berührung kommen als die kurzlebigen – und deshalb genetisch variabler sein müssen.

Neuere Untersuchungen lieferten zusätzliche Hinweise. Curtis Lively von der Indiana-Universität in Bloomington zeigte, dass asexuelle Populationen der Deckelschnecke *Potamopyrgus antipodarum* stärker von parasitischen Würmern befallen werden als sexuelle Populationen. Und Steven Kelley von der Emory-Universität in Atlanta (Georgia) fand beim Gewöhnlichen Ruchgras *(Anthoxanthum odoratum)*, das sich ebenfalls sexuell und asexuell vermehrt, dass die sexuellen Populationen seltener unter Viren leiden. In meiner Arbeitsgruppe ließen wir »Killer« und »Sensibelchen« der Brauhefe *(Saccharomyces cerevisiae)* gegeneinander antreten. Die Killerstämme verhalten sich wie Krankheitskeime: Sie zerstören die sensiblen Artgenossen und vermehren sich auf deren Kosten. Wie wir feststellten, können sich die sensiblen Hefestämme besser gegen ihre aggressiven Kollegen wehren, wenn sie sich sexuell fortpflanzen. Im Gegenzug werden auch die Killer effizienter, sobald sie diese Strategie verfolgen. Wenn beide Stämme auf geschlechtliche Vermehrung setzen, dann endet das Gerangel oft unentschieden.

Von allen Theorien über Sex scheint jene, die von einem Wettstreit mit Erregern ausgeht, experimentell am besten belegt zu sein. Aber noch ist es zu früh, die anderen zu verwerfen. Wie schaffen es etwa die Rädertiere, Epidemien zu entgehen, obwohl sie sich asexuell vermehren? Noch fehlt eine gute Antwort darauf, aber Matthew Meselson von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) hat Belege dafür, dass die Rotiferen höchstens ein paar mobile DNA-Elemente besitzen, die im Erbgut »springen« und ernste Mutationen verursachen können. Vielleicht sind die Geschöpfe nicht so stark durch gefährliche Mutationen belastet wie die meisten anderen Organismen. Und so mag sich die These doch noch als stichhaltig erweisen, dass Sex in erster Linie dazu da ist, die Auswirkungen gefährlicher Mutationen zu mindern. Vertrauen wir darauf, dass die Rädertiere Außenseiter sind. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEIS



Christopher Wills ist Biologe an der Universität von Kalifornien in San Diego und Autor des Buches »Understanding Evolution«, das demnächst erscheinen wird. © New Scientist

Roles for mating and environment in *C. elegans* sex determination. Von V. Prahlad, D. Pilgrim und E. B. Googwin in: Science, Bd. 302, S. 1047, 2003

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Streit um das Ende der Dinosaurier

Nach jahrzehntelangen Debatten schien sich die Ansicht durchgesetzt zu haben, dass der Einschlag eines Himmelskörpers, dessen Krater in Mexiko entdeckt wurde, das Massensterben am Ende der Kreidezeit auslöste. Doch Skeptiker erheben neue Einwände.

Von Erwin Lausch

Noch immer erhitzt die Frage die Gemüter nicht nur von Forschern: Was geschah am Ende der Kreidezeit, in einer der dramatischsten Phasen der Erdgeschichte vor 65 Millionen Jahren? Glaubt man der Vorstellung, die bei den Geowissenschaftlern mittlerweile großenteils anerkannt und auch in der Öffentlichkeit weit verbreitet ist, stürzte ein etwa zehn Kilometer großer Himmelskörper, ein Asteroid oder Komet, auf die Erde und schuf einen mindestens 180 Kilometer weiten Krater. Durch die Folgen des Einschlags – oder Impakts, wie Fachleute sagen – geriet das Leben weltweit in eine seiner schwersten Krisen: Nicht nur die Dinosaurier starben aus, sondern mit ihnen etwa 75 Prozent aller damaligen Tier- und Pflanzenarten.

Nach gängiger Meinung liegt der Krater, den die Bombe aus dem All hinterließ, am Nordende der mexikanischen Halbinsel Yukatan, halb an Land und halb im Meer. Am Erdboden ist von ihm freilich nichts zu sehen: Die gewaltige Narbe in der Erdkruste, damals von einem flachen Meer bedeckt, wurde im Laufe der Jahrmillionen Hunderte von Metern tief unter jüngeren Ablagerungen begraben. Geowissenschaftler entdeckten sie zufällig bei der Auswertung jahrzehntealter Kerne von Erdölbohrungen und mittels geophysikalischer Sondierungen. Nach einer lokalen Kleinstadt tauften sie den verschütteten Krater »Chicxulub«.

Auch nachdem an seiner Existenz – spätestens seit 1991 – kein Zweifel mehr bestand, blieben noch viele Fragen über seine Struktur zu klären. Deshalb war eines der ersten Projekte des internationalen kontinentalen Bohrprogramms, das auf Initiative deutscher Geowissenschaftler Mitte der 1990er Jahre aus der Taufe gehoben wurde, eine Bohrung in den Chicxulub-Krater. Nach einer nahe gelegenen Hazienda Yaxcopoil-1 oder kurz Yax-1 genannt, erreichte sie Ende 2001 eine Tiefe von 1511 Metern.

Der mit Spannung erwartete Bohrkern ist inzwischen untersucht – und hat neue heftige Auseinandersetzungen ausgelöst. Die Befunde sind in zwei Sonderausgaben der Zeitschrift »Meteoritics and Planetary Science« vom Juni und Juli dieses Jahres zusammengetragen (Bd. 39, Heft 6 und 7, 2004). Über ihre Deutung stritten aber schon im Herbst 2003 die Teilnehmer der dritten internationalen Konferenz über große Meteoriten-Einschläge in Nördlingen.

Während die Mehrzahl der Chicxulub-Experten ihre Vorstellungen in den Grundzügen bestätigt sah, bezweifelte eine Schar von Dissidenten alle für sicher erachteten Erkenntnisse über den Krater und seine Bedeutung. Ihre Wortführerin ist Gerta Keller von der Universität Princeton (New Jersey), sekundiert von Wolfgang Stinnesbeck von der Universität Karlsruhe und Thierry Adatte von der Universität Neuchâtel (Schweiz). Nach Ansicht dieser Abweichler

- misst der Chicxulub-Krater nicht 180, sondern maximal 120 Kilometer;
- ereignete sich der Einschlag nicht genau an der Wende zwischen Kreidezeit und Tertiär – also am Übergang zwischen Erdmittelalter und -neuzeit –, sondern etwa 300 000 Jahre früher;
- war am großen Sterben zum Ende der Kreidezeit ein anderer Impakt beteiligt, dessen Krater bisher unbekannt ist. ▷

▶ So könnte es ausgesehen haben, als vor 65 Millionen Jahren bei der heutigen Halbinsel Yukatan ein Himmelskörper von rund zehn Kilometer Durchmesser in ein flaches Meer einschlug und einen 180 bis 280 Kilometer breiten Krater erzeugte. Der Aufprall hatte verheerende Auswirkungen auf das Klima und löste nach gängiger Meinung das Massensterben am Ende der Kreidezeit aus, dem die Dinosaurier zum Opfer fielen.


NASA / JPL / DONALD E. DAVIS

Solcher Streit hat Tradition. Er tobt schon, seit amerikanische Forscher 1980 die Einschlagthese aufstellten. Tausende von Untersuchungen wurden zu diesem Thema veröffentlicht. Über keinen anderen Abschnitt der Erdgeschichte ist wohl so viel geschrieben und diskutiert worden wie über den Grenzbereich zwischen Kreide und Tertiär. Trotzdem lässt sich kein Ende der Debatte absehen. Die Kontroverse verebbte nicht, als mit Chicxulub ein in Größe und Alter passender Krater für den Impakt entdeckt wurde, und auch die jüngste Bohrung brachte sie nicht zum Verstummen.

Tief verwurzelte Vorbehalte gegen Katastrophentheorien

Im Grunde reichen die Wurzeln des Streits bis weit in das 19. Jahrhundert zurück. Als damals die Grundlagen der Paläontologie geschaffen wurden, zeigte sich schnell, dass sich die fossil überlieferten Lebewesen der Vergangenheit deutlich von denen der Gegenwart unterscheiden. Demnach mussten sich Tier- und Pflanzengesellschaften im Laufe der Erdgeschichte immer wieder verändert haben. Das bot den Forschern die Möglichkeit, mit Hilfe von »Leitfossilien«, die in den Gesteinen ganz bestimmter Zeitabschnitte weit verbreitet sind, die Erdgeschichte zu gliedern.

Über 99 Prozent aller Arten, die jemals gelebt haben, sind längst wieder ausgestorben. Aus den jeweils Überlebenden entwickelten sich neue Spezies. Neben dem gleichmäßigen Artenschwund registrierten die Paläontologen aber auch Phasen besonders massiven Artensterbens, denen entsprechend tief greifende Erneuerungen folgten. Zwei derart drastische Einschnitte in der Entwicklung des Lebens wurden um die Mitte des 19. Jahrhunderts als Grenzen zwischen Altertum, Mittelalter und Neuzeit der Erde definiert.

Schon damals galten die Dinosaurier, die in den Ablagerungen des Erdmittelalters häufig vorkommen, aber in Gesteinen der Erdneuzeit fehlen, als hervorstechendes Beispiel für das Aussterben ganzer Tierordnungen – auch über die Fachgrenzen hinaus. »Es starb zu derselbigen Stunde«, ulkte der Schriftsteller Joseph Victor von Scheffel in einem seiner Studentenlieder, »die ganze Saurierei. Sie kamen zu tief in die Kreide, da war es natürlich vorbei.«

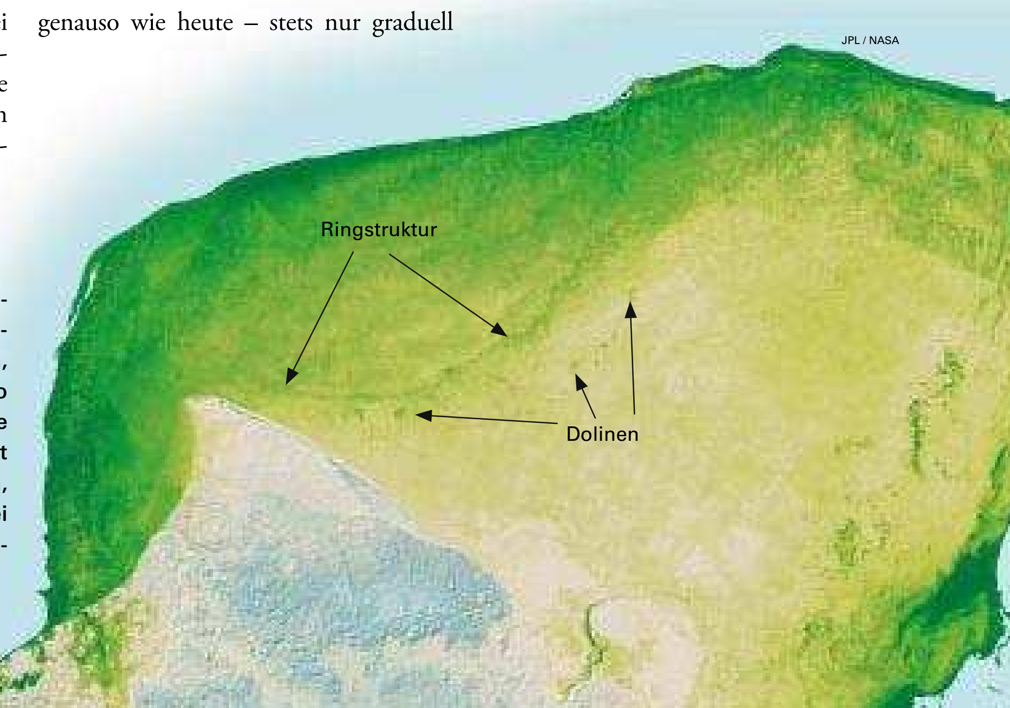
War schon das ständige Vergehen und Entstehen von Arten nicht leicht zu erklären, so galt das erst recht für die Massensterben – zumal zu einer Zeit, als die Aussagen der Bibel noch weithin auch als naturwissenschaftliche Wahrheit galten. Immerhin ist im Alten Testament von der Sintflut die Rede. Nun ließ sich die Vielfalt der mächtigen Ablagerungen mit ihrem wechselnden Inhalt an Fossilien zwar nicht durch eine einzige große Überschwemmung erklären. Aber konnten es vielleicht auch mehrere gewesen sein? Vor diesem Hintergrund entstand eine Katastrophenlehre, der zufolge in der Vergangenheit immer wieder gewaltige Wassermassen alles Land überfluteten. Ihr prominentester Vertreter war der französische Zoologe Georges Cuvier (1769–1832), einer der bedeutendsten Naturforscher seiner Zeit.

Ganz anders sahen das zwei schottische Geologen: James Hutton (1726–1797) und Charles Lyell (1797–1875). Sie fühlten sich weder dem Schöpfungsbericht in der Bibel verpflichtet noch glaubten sie an irgendwelche Kräfte, die unerklärbar in ferner Vergangenheit wirkten. Vielmehr habe sich die Erde – genauso wie heute – stets nur graduell verändert, also allmählich und in kleinen Schritten. Sind die Wandlungen in der Gegenwart auch minimal, so nehmen sie über geologische Zeiträume doch gewaltige Ausmaße an. Die Vertreter dieses Gradualismus suchten folglich allein aus der Beobachtung gegenwärtiger geologischer Vorgänge Rückschlüsse auf Vorgänge in der Erdgeschichte zu ziehen. Die Gegenwart ist der Schlüssel zur Vergangenheit, lautete ihre Devise.

Dieses heute als Aktualismus bekannte Motto erwies sich als überaus fruchtbarer Ansatz für die Geowissenschaften. Die Katastrophenlehre hingegen galt bald als überholt, schlimmer noch: als unwissenschaftlich, ja lächerlich. Vor diesem Hintergrund ist die verbreitete Ablehnung zu verstehen, die der Impakt-Theorie zur Erklärung des Massensterbens am Ende der Kreidezeit zunächst entgegenschlug. Viele Geologen sahen darin eine Wiederkehr der Katastrophenlehre und waren peinlich berührt. Dabei lagen der Idee in diesem Fall sehr wohl harte, überprüfbare Fakten zu Grunde.

Kosmisches Iridium

Die Grenze zwischen den erdgeschichtlichen Epochen Kreide und Tertiär zeichnet sich in Gesteinen, die damals unter Wasser abgelagert wurden, durch eine dunkle, meist nur wenige Zentimeter dicke Tonschicht ab. Die Existenz eines solchen »Grenztons« – etwa in der Nähe der mittelitalienischen Stadt Gubbio, wo er Kalksteinschichten der Kreidezeit von solchen des Tertiärs trennt – war in den



Obwohl der einstige Krater am Boden nicht mehr zu erkennen ist, zeigen Satellitenaufnahmen Ringstrukturen, die beim Einschlag entstanden sind. So zeigt diese farbcodierte Höhenkarte, die per Radar von der Raumfähre aus erstellt wurde, einen halbkreisförmigen Graben, der etwa fünf Kilometer breit und nur drei bis fünf Meter tief ist. Weit gehend parallel dazu verläuft ein Kranz von Dolinen.

1970er Jahren allgemein bekannt. Doch im Laufe welcher Zeitspanne hatte sich die Schicht abgesetzt? Das fragten sich damals viele Geologen – freilich ohne Hoffnung auf baldige Antwort; denn es gab kein probates Verfahren, Zeiträume auf weniger als 10 000 Jahre genau zu bestimmen.

An der Universität von Kalifornien in Berkeley hatten der Geologe Walter Alvarez und sein Vater Luis, Physiker und Nobelpreisträger, dazu jedoch eine neue Idee: Sie wollten die staubfeine kosmische Materie, die Jahr für Jahr aus dem All auf die Erde rieselt, als Zeitmesser nutzen. Dieser himmlische Dreck hat eine andere Zusammensetzung als irdisches Gestein. Er enthält wie alles, was aus dem All zu uns kommt, das auf der Erde extrem seltene Edelmetall Iridium in erheblich größeren Mengen. Relativ viel Iridium im Grenzton, so die Überlegung von Vater und Sohn Alvarez, ließe auf Jahrtausende der Ablagerung schließen, wenig Iridium auf nur Jahrhunderte oder gar Jahre. Auskunft über den Iridiumgehalt des Grenztons sollte ein hoch empfindliches neues Verfahren geben: die Neutronenaktivierungsanalyse.

Das Geologe-Physiker-Gespann erlebte jedoch eine herbe Enttäuschung: Die Konzentrationen, die bei den Untersuchungen im Lawrence Livermore National Laboratory herauskamen, fielen überhaupt nicht in die erwartete Spanne, sondern waren entschieden zu hoch. Ein Jahr lang hielten die verblüfften Forscher die Ergebnisse unter Verschluss. Sie untersuchten Grenztone aus Dänemark und Neuseeland und fanden auch dort ungewöhnliche Anreicherungen von Iridium. Daraufhin diskutierten sie ihre Ergebnisse mit Kollegen und überschlugen anhand ihrer Stichproben, wie viel von dem Edelmetall vor 65 Millionen Jahren weltweit zusätzlich zu dem ständigen Strom durch den kosmischen Staub auf die Erde gelangt sein musste.

Anfang Juni 1980 veröffentlichten sie ihre Deutung schließlich in der Wissenschaftszeitschrift »Science«: Ein Asteroid oder Komet mit mindestens zehn Kilometer Durchmesser sei vor 65 Millionen Jahren auf die Erde gestürzt und beim Aufprall verdampft. So habe sich das Iridium über den Planeten verteilt.

Wie von Zauberhand schien sich damit auch das Massensterben zu erklären: Durch den Impakt wurde, so das plausible Katastrophenszenario, die Erde in eine Staubwolke gehüllt, die monatelang das Sonnenlicht abschirmte. Ohne Sonne kam die Photosynthese der Pflanzen an Land wie im Meer zum Erliegen. Den Tieren, die direkt oder indirekt von Pflanzen leben, wurde die Nahrungsgrundlage entzogen. So starben viele Arten aus.

Kahlschlag beim Plankton

Diese Fotomontage illustriert den Kahlschlag unter den Plankton-Foraminiferen am Übergang zwischen Kreidezeit und Tertiär. Die mikroskopisch kleinen Einzeller mit Kalkgehäuse, die in den Ozeanen treiben, finden sich in der obersten Kreideformation noch in großer Zahl und Artenvielfalt. Dagegen gibt es in den untersten Tertiärschichten nurmehr wenige, kümmerliche Exemplare. Die Grenze dazwischen besteht aus einer nur wenige Zentimeter dicken Lage aus Ton. Sie ist reich an Auswurfmaterial, das beim Einschlag eines Himmelskörpers hoch in die Atmosphäre geschleudert wurde und sich über den gesamten Globus verteilt hat. Außerdem enthält sie ungewöhnlich viel Iridium.



A. MONTANARI

Überleben in der Hölle

Die Publikation erregte enormes Aufsehen. Es war nicht allein die unheimliche Vorstellung einer urplötzlich aus dem All über die Erde hereinbrechenden Katastrophe, die instinktive Ablehnung hervorrief. Auch die Grundlagen der Evolutionslehre schienen erschüttert. Hatte Charles Darwin nicht gelehrt, dass sich das Leben Schritt für Schritt weiterentwickelt und im Kampf ums Dasein jene Arten gewinnen, die an die Bedingungen ihrer jeweiligen Umwelt am besten angepasst sind? Bei einem Impakt aber nützt selbst eine noch so gute Anpassung an irdische Umstände nichts. Das Überleben hängt allein von glücklichen Zufällen ab.

War es vorstellbar, dass ganze Gruppen von Organismen wie die Dinosaurier oder die Ammoniten, die sich in großer Artenvielfalt weit über 100 Millionen Jahre lang erfolgreich entwickelt hatten, gleichsam von heute auf morgen ausgelöscht wurden und die Verlierer von gestern plötzlich unverdiente Gewinner waren? »Der Impakt an der Kreide-Tertiär-Grenze«, formulierte der Chicxulub-Forscher Alan Hildebrand von der Universität Calgary (Alberta), »verwandelte die Erdoberfläche in eine lebende Hölle, in eine dunkle, brennende, schweflige Welt, in der sich alle Regeln für das Überleben der am besten Angepassten innerhalb von Minuten veränderten.«

Und so formierte sich eine Opposition mit einem Gegenmodell zur Einschlagtheorie, die so gar nicht in ihr naturwissenschaftliches Weltbild passte: Vulkane sollten nun die Übeltäter sein. Tatsächlich traten um die Wende von der Kreide zum Tertiär über einen Zeitraum von mehreren Millionen Jahren hinweg im Westen des indischen Subkontinents immer wieder immense Lavaströme aus und erstarrten zu einer der größten Flutbasaltdecken auf der Erde: bis 2400 Meter mächtigen Schichten, die unter Experten als Dekkan-Trapps bekannt sind. Nach Schätzungen von Vulkanologen haben sich gut zwei Millionen Kubikkilometer Lava über mehr als zwei Millionen Quadratkilometer Land ergossen.

Sicherlich beeinflussten die Gase, die in den aktiven Eruptionsphasen zusammen mit den Magmamassen austraten, das irdische Klima. Doch bislang gibt es keine Hinweise darauf, dass Fauna und Flora während einer solchen Eruption von Flutbasalten, wie sie auch zu anderen Zeiten stattfand, nennenswert litten. Außerdem ließ sich der hohe Iridiumgehalt des Grenztons, der bald an vielen Stellen der Erde nachgewiesen wurde, ▷


J. SMIT

Vom Meteoriteneinschlag, der den Chicxulub-Krater schuf, zeugen unter anderem solche Glaskügelchen. Sie entstanden, als ausgeschleuderte Tröpfchen geschmolzenen Gesteins in der Atmosphäre erstarrten. Im Nordosten Mexikos kommen sie auch in Sedimenten vom Ende der Kreidezeit vor. Einige Paläontologen schließen daraus, dass der Chicxulub-Einschlag schon vor der Wende zum Tertiär stattfand und nicht das Massensterben verursacht haben kann.

durch den Vulkanismus in Indien nicht befriedigend erklären. Bei anderen typischen Zeugnissen für einen Impakt, die sich in der an Iridium reichen Schicht fanden – speziell deformierte (»geschockte«) Quarzkristalle, eine Hochdruckform des Quarzes (Stishovit) und eine Gruppe von Mineralien, die als nickelreiche Spinelle bezeichnet werden – schied ein vulkanischer Ursprung ohnehin aus.

Zwar war zunächst kein passender Krater bekannt, doch sprach das nicht ernsthaft gegen die Impakt-These. In 65 Millionen Jahren konnte selbst ein riesiger Krater durch Erosion bis zur Unkenntlichkeit abgetragen oder von jüngeren Sedimenten verschüttet worden sein. War der Asteroid ins Meer gestürzt, bestanden noch weniger Chancen, seine Spur zu finden.

Lücken in der Chronik des großen Sterbens

Doch die Verfechter der Einschlagtheorie hatten Glück: Nach der Entdeckung von Chicxulub ließ sich nicht länger leugnen, dass ein riesiges kosmisches Geschoss auf die Erde geprallt war. Die Skeptiker blieben allerdings unbeeindruckt. Sie fragten nach den Beweisen dafür, dass so viele Arten wirklich durch den Impakt ausgelöscht wurden und nicht doch aus anderen Gründen ausstarben.

Vor allem Paläontologen ließen sich nicht so leicht überzeugen. Natürlich stand fest, dass die meisten Spezies aus der Kreidezeit im Tertiär nicht mehr existierten. Doch waren sie wirklich alle genau an der Grenze der beiden Erdzeitalter verschwunden? Fossilfunde schienen stattdessen zu belegen, dass die Arten im Laufe von Millionen Jahren nach und nach ausstarben. Außerdem gab es Berichte, wonach einige der vermeintlich am Ende der Kreide untergegangenen Tierstämme den Beginn des Tertiärs noch erlebten.

Luis Alvarez hatte, als er 1988 starb, längst die Geduld verloren. Als Physiker zweifelte er nicht daran, dass der Aufprall eines Himmelskörpers furchtbare Folgen für das irdische Leben gehabt haben muss. Schließlich wurde dabei eine Energie entfesselt wie bei der Explosion von Millionen Wasserstoffbomben. Wenn die Paläontologen das große Sterben nicht entdeckten, schrieb er in einem wütenden Artikel in der »New York Times«, konnte das nur an ihrer Inkompetenz liegen.

Doch Alvarez unterschätzte einfach die Schwierigkeiten, mit denen Paläontologen zu kämpfen haben. Was in den Gesteinen von der Erdgeschichte überliefert ist, wird gern mit einer Chronik verglichen, aus der viele Seiten herausgerissen sind. Eigentlich fehlt sogar das meiste. Selbst vorhandene Seiten sind oft fast oder völlig leer: Obwohl es von Leben nur so gewimmelt haben muss, gibt es keine oder kaum Fossilien. Lebensreste bleiben nämlich nicht so ohne weiteres erhalten – ihre Bewahrung erfordert ganz besondere Umstände.

Gerade bei den Dinosauriern, die zum Symbol des Massensterbens wurden, sind die Voraussetzungen für die genaue Datierung ihres Exitus denkbar ungünstig. Herauszufinden, wie viele Arten exakt an der Kreide-Tertiär-Grenze auf der Strecke geblieben sind, erwies sich bei der Lückenhaftigkeit der Überlieferung als äußerst schwierig. Das in der Paläontologie gewohnte grobe Zeitraster von Millionen Jahren genügte da nicht mehr.

Obwohl Dinosaurierknochen vielerorts gefunden wurden, gibt es auf der ganzen Erde nur wenige Stellen, an denen Ablagerungen, die günstige Bedingungen für die Konservierung der »schrecklichen Echsen« bieten, von der Kreidezeit bis zum Übergang ins Tertiär ungestört erhalten sind. Akribisch durchmusterten Spezialisten diese Sedimente auf Dinosaurierreste und wurden reichlich fündig – allerdings nur bis drei Meter unterhalb der Kreide-Tertiär-Grenze. Dort war Schluss mit den fossilen Knochen. Trotzdem ließen sich bis 37 Zentimeter unterhalb der Grenze Trittspuren von Dinosauriern ausmachen. Demnach gab es die Echsen noch; nur hinterließen sie keine Knochen mehr.

Tatsächlich fehlen in den obersten Metern der Kreide auch Fossilien von anderen Wirbeltieren. Offenbar haben sich also die Bedingungen für die Erhaltung von Knochenmaterial rapide verschlechtert, was einen Niedergang der Dinosaurier vor dem Impakt lediglich vortäuschte.

Makabrer Zombie-Effekt

Zu diesem falschen Eindruck trugen auch mangelhafte statistische Ansätze bei: Eine viele Millionen Jahre lange Entwicklungsgeschichte wurde mit einer viel kürzeren Endphase verglichen, in der natürlich entsprechend weniger Fossilien vorkamen – oder eben auch zufällig gar keine. So entstand die lange herrschende Lehrmeinung, dass sich die Dinosaurier schon Jahrmillionen vor dem Ende der Kreidezeit auf dem absteigenden Ast befanden. Etwas anderes konnten sich viele Paläontologen vor der Diskussion über den Impakt ohnehin nicht vorstellen.

Für einige Aufregung sorgten auch Dinosaurierzähne, die noch in frühen Ablagerungen des Tertiärs gefunden wurden. Sie schienen der Beweis, dass die Echsen den Einschlag sehr wohl überlebt hatten. Penible Nachuntersuchungen ergaben jedoch, dass die Zähne in Wahrheit eben doch aus der Kreidezeit stammten. Nach der Erosion des Gesteins, in dem sie ursprünglich gesteckt hatten, waren sie in eine Rinne mit jüngeren Ablagerungen gespült worden. Eine solche Wiederaufarbeitung, als »Zombie-Effekt« bekannt, ist nicht ungewöhnlich und macht den Paläontologen das Leben schwer.

Selbst bei den viel häufigeren Ammoniten spielte die Statistik den Forschern zunächst einen Streich. Bei Untersuchungen an einem musterhaft vollständigen Profil in Nordspanien wurden zwar noch zwanzig Zentimeter oder we-

niger unterhalb der Kreide-Tertiär-Grenze verschiedene Arten geborgen, aber unmittelbar darunter kein einziges Exemplar mehr. Diese Lücke entpuppte sich später jedoch als rein lokales Phänomen. An anderen Stellen fanden sich letzte Ammoniten auch direkt an der Grenze.

»Ich war ursprünglich derjenige«, bekannte Peter Ward von der Universität von Washington in Seattle, »der in alle Welt hinausposaunte, dass die Ammoniten schon vor der Grenze ausstarben. Aber nun bin ich überzeugt: Sie starben direkt an der Grenze aus.«

Solche Erfahrungen waren durchaus heilsam. Die anhaltenden Diskussionen über den Impakt zwangen die Paläontologen, sich mit den Tücken ihres Arbeitsfeldes intensiver auseinander zu setzen. Viel mehr als früher achten sie jetzt auf Lücken in den überlieferten Gesteinen und die Wiederaufarbeitung von Fossilien. Außerdem berücksichtigen sie den nach zwei Kollegen benannten »Signor-Lipps-Effekt«, der einen an sich simplen Sachverhalt beschreibt: Das jüngste Fossil, das Forscher in einem Gesteinsstapel von einer Spezies finden, war mit größter Wahrscheinlichkeit nicht der letzte Vertreter seiner Art weltweit, erst recht nicht bei seltenen Arten. Neue statistische Ansätze wurden entwickelt, die eine realistischere Auswertung der fast immer beklagenswert spärlichen Funde erlauben.

Über die Jahre bekehrte sich dadurch mancher – wie Ward – vom Saulus zum Paulus. Andere Paläontologen rangen sich zu einem Kompromiss durch: Sie streiten beträchtliche Auswirkungen des Impakts nicht mehr ab, schreiben aber zugleich dem indischen Vulkanismus, Schwankungen des Meeresspiegels sowie Klimaänderungen in den Jahrmillionen vor der Kreide-Tertiär-Grenze eine meist nicht näher spezifizierte Rolle zu.

Plankton als Kronzeuge

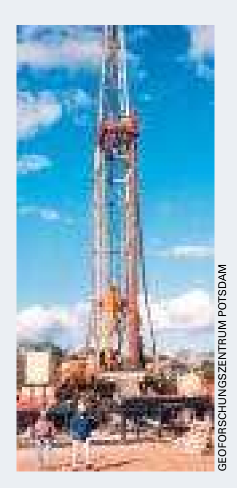
Auch in dem neuen Streit geht es wieder um die alte Frage: plötzliches Aussterben oder allmählicher Niedergang? Verknüpft wird sie mit Zweifeln an der Rolle des Einschlags, der den Chicxulub-Krater schuf. Die neuen Abweichler glauben beweisen zu können, dass dieser spezielle Impakt von seinem Ausmaß und genauen Zeitpunkt her für das Massensterben am Ende der Kreidezeit gar nicht verantwortlich sein konnte.

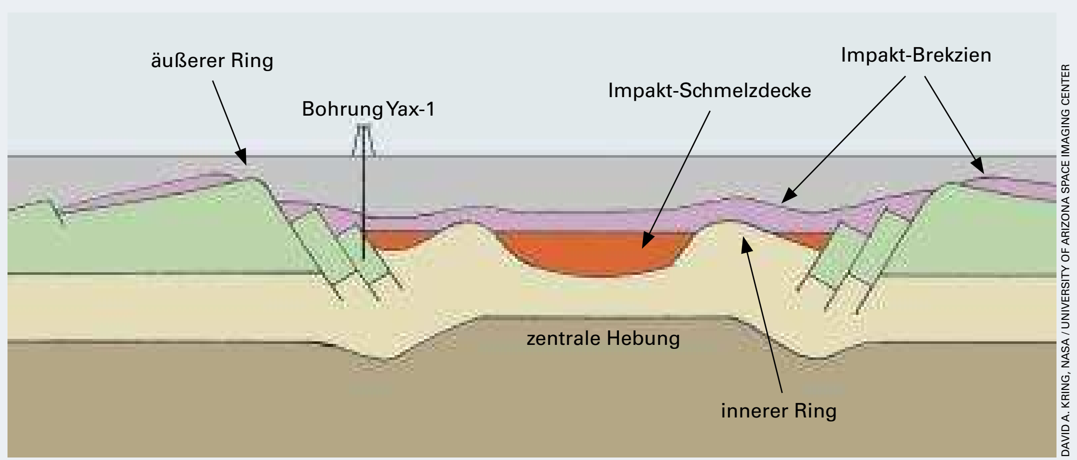
Den Part der Kronzeugen spielen dabei Lebewesen, die im Unterschied zu Dinosauriern und Ammoniten reichlich vorhanden sind: Plankton-Foraminiferen. An den mikroskopisch kleinen Einzellern, die in den Ozeanen treiben und deren kalkige Gehäuse sich nach dem Tod der Organismen am Meeresboden sammeln, herrschte in der Kreidezeit wie im Tertiär kein Mangel. Sie bevölkerten und bevölkern die Meere in zahlreichen Arten, die sich an den hinterlassenen Kalkpanzern unterscheiden lassen. Nur ein Teil von ihnen ging am Ende der Kreidezeit zu Grunde, während aus den Überlebenden neue Arten entstanden. Schon seit Jahrzehnten wird erbittert darüber gestritten, welche Foraminiferen seinerzeit ausstarben und wann genau ihre Todesstunde schlug.

Als Widerpart von Gerta Keller und ihren Anhängern profilierte sich dabei Jan Smit von der Freien Universität Amsterdam, der zu den Protagonisten der Impakt-Hypothese zählt. Ende der 1970er Jahre hatte er in Südostspanien an einem Paradeprofil über die Kreide-Tertiär-Grenze hinweg den Bestand an Foraminiferen aufgenommen, als die Nachricht von den überraschend hohen Iridiumwerten im Grenzton von Gubbio die Runde machte. Er fand in der betreffenden Schicht gleichfalls reichlich Iridium und sprach sich als einer der Ersten für einen Asteroideneinschlag als Ursache des Massensterbens aus.

Smit kam damals in Spanien zu dem Ergebnis, dass alle Plankton-Foraminiferen mit Ausnahme einer einzigen Art genau an der Grenze ausgestorben seien. Doch Gerta Keller, die sich seit Mitte der 1980er Jahre mit Foraminiferen beschäftigt und darüber zahlreiche Arbeiten veröffentlicht hat, widersprach. Nach ▷

Der Untergrund des Kraters





Eine 1511 Meter tiefe Bohrung, die im Jahre 2001 sechzig Kilometer vom Zentrum des Chicxulub-Kraters entfernt niedergebracht wurde, sollte die Verhältnisse am Kraterboden klären. Nach Ansicht der Befürworter der Einschlagtheorie bestätigte sie das bisherige Modell, nach dem von den Seiten her große Schollen in den primären Krater gerutscht sind und ihn dadurch erweitert haben. Die so entstandene Struktur ist in dem geologischen Schnitt dargestellt. Kritiker behaupten dagegen, diese angeblich gerutschten Schollen seien in Wahrheit an Ort und Stelle geblieben und lägen außerhalb des Kraterrandes. Die Einschlagnarbe sei demnach maximal 120 Kilometer breit – viel schmaler als die bisher angenommenen 180 bis 280 Kilometer.

Fragwürdige Fossilien

G. KELLER

0,2 mm

Rugoglobigerina macrocephelaa

0,2 mm

Rugoglobigerina rugosa

0,2 mm

Globotruncana insignis

0,2 mm

Plummerita hantkeninoides

Gerta Keller von der Universität Princeton (New Jersey) und Kollegen haben in einer 50 Zentimeter dicken Scheibe des Bohrkerns oberhalb der Impaktit-Schicht, die sich unmittelbar nach dem Einschlag abgelagert hat, Kalkstrukturen (farbig) gefunden, die den Schalen mehrerer Foraminiferen-Arten aus der Kreidezeit ähneln. Sie schließen daraus, dass entweder der Chicxulub-Einschlag schon vor der Grenze zum Tertiär stattfand oder die Foraminiferen erst zu Beginn des Tertiärs ausstarben. Andere Wissenschaftler halten die Kalkstrukturen dagegen für bloße Dolomitkristalle oder glauben, dass sie durch Erosion und erneute Ablagerung nachträglich in jüngere Sedimentschichten gelangt sind.

▷ ihren Untersuchungen an verschiedensten Punkten der Erde schwanden die Plankton-Foraminiferen der späten Kreidezeit stufenweise: Nur rund die Hälfte der Arten starb an oder wenigstens in der Nähe der Grenze zum Tertiär aus, ein Sechstel ging schon früher zu Grunde, ein Drittel überlebte bis in die Erdneuzeit hinein.

Um die Unstimmigkeit aufzuklären, wurde seinerzeit ein »Blindversuch« ausgerichtet, bei dem vier andere Mikropaläontologen einschlägige Proben auf Plankton-Foraminiferen untersuchten. Jeder wusste zwar, dass das Material von einem klassischen Profil bei El Kef in Tunesien stammte, das die Internationale Kommission für Stratigrafie zu einem »Stratotyp« erklärt hatte: einem Standard in der Abfolge und der Beschaffenheit der Schichten. Die vier Experten erhielten aber keine Auskunft darüber, welchen Schichten ihre Proben jeweils entnommen waren.

Die Ergebnisse wurden 1994 bekannt gegeben und bestätigten auf den ersten Anschein, was Gerta Keller gefunden hatte: kein schlagartiges Aussterben, sondern ein graduelles. Die Forscherin sah es damit als erwiesen an, dass alles Mögliche – Klimaänderungen, Meeresspiegelschwankungen, Sauerstoffmangel in den Ozeanen und Vulkanismus – zum allmählichen Aussterben der kreidezeitlichen Plankton-Foraminiferen geführt habe. Einem Impakt schrieb sie nur vergleichsweise geringe Bedeutung zu, und das auch nur in niederen Breiten.

Dolomitkristalle oder Kalkpanzer

Bei genauem Hinsehen verdeutlichte der Blindversuch von El Kef aber vor allem die Schwierigkeiten, selbst bei den in Meeressedimenten reichlich vorhandenen Foraminiferen zu eindeutigen Ergebnissen zu kommen. Die Urteile der Experten wichen erheblich voneinander ab. Nicht einmal in der Abgrenzung der einzelnen Arten waren die vier sich einig. Außerdem erwiesen sich die Proben im Nachhinein als zu klein – wären sie größer gewesen, hätte man wohl festgestellt, dass mehr Foraminiferen erst an der Grenze ihr Schicksal ereilte. Überdies wurde der Signor-Lipps-Effekt noch nicht beachtet.

Auch Gerta Keller spricht inzwischen vom »Aussterben aller tropischen und subtropischen Arten« an der Kreide-Tertiär-Grenze. Dennoch hat sie die Wende allenfalls halbherzig vollzogen. Immer wieder ist das Bestreben zu erkennen, die Bedeutung eines Einschlags aus dem All herunterzuspielen. Der Impakt, sagt sie mit einer englischen Redewendung bis heute, »war lediglich der Strohhalm, der den Rücken des Kamels brach«. Den Satz hat sie nicht nur erst kürzlich wieder in einer Pressemitteilung ihrer Universität verbreiten lassen, er steht auch in einer ihrer wissenschaftlichen Veröffentlichungen aus jüngster Zeit.

Durch die Bohrung Yax-1 hat der alte Foraminiferen-Streit nun neue Nahrung erhalten. Dabei geht es um fünfzig Zentimeter Sediment, die sich im Bohrkern unmittelbar über der Schicht mit den Einschlagtrümmern befinden, sich also erst nach dem Impakt abgelagert haben. Gerta Keller und ihre Kollegen berichteten auf dem Nördlinger Kongress, sie hätten dort Foraminiferen aus der Endphase der Kreidezeit nachgewiesen. Der Impakt, der Chicxulub erzeugte, könne somit gar nicht derjenige gewesen sein, der die Kreidezeit mit einem Massensterben abrupt beendete. Nach ihren Schätzungen müsste er 300 000 Jahre früher stattgefunden haben. Der Krater für den verheerenden Einschlag an der Kreide-Tertiär-Grenze bleibe somit noch zu finden.

Die Kollegen im Saal nahmen die Botschaft skeptisch bis frostig auf. Der ewige Gegenspieler Jan Smit war nicht anwesend, aber andere Diskussionsredner machten eine Verwechslung mit Dolomitkristallen geltend. Smit schloss sich dieser Auffassung später an und untermauerte sie in etlichen Internet-Diskussionsrunden, größtenteils mit Gerta Keller allein. Selbst wenn in dem kritischen Abschnitt Kreide-Foraminiferen gefunden würden, erklärte er, wären sie aufgearbeitet – nichts Spektakuläres also. Dagegen bietet Gerta Keller mancherlei Argumente auf, die nach ihrem Dafürhalten eine Wiederaufarbeitung ausschließen. Beide Kontrahenten schenken sich nichts und unterstellen einander einen Mangel an Einsicht.

Die These, dass der Chicxulub-Einschlag dem Ende der Dinosaurier 300 000 Jahre vorausgegangen sei, hatten Keller und ihre Mitstreiter allerdings schon vor einigen Jahren aufgestellt. Damals stützten sie sich auf Untersuchungen von Glaskügelchen, die bei starken Einschlä-

gen gebildet werden, wenn ausgeschleuderte winzige Tröpfchen geschmolzenen Gesteins in der Atmosphäre erstarren. Diese sinken nach oft Tausende von Kilometer weitem Flug zur Erde. Keller, Stinnesbeck und Adatte haben – ebenso wie Smit – solche »Mikrotektite« in weitem Umkreis des Chicxulub-Kraters untersucht. Vielerorts wurden mehrere Lagen gefunden, wobei Einigkeit darüber herrscht, dass die oberen Schichten jeweils anderswo abgetragen und unter Wasser aufs Neue abgelagert, also wiederaufgearbeitet worden sind.

Kein Konsens besteht dagegen bei einer speziellen Fundstätte im Nordosten Mexikos. Dort gibt es Mikrotektit-Lagen in Sedimenten aus der letzten Phase der Kreidezeit. Demnach muss der Chicxulub-Impakt, von dem sie stammen, schon vor der Wende zum Tertiär stattgefunden haben – so der Schluss, den Frau Keller und ihre Mitarbeiter seinerzeit zogen. Smit liefert jedoch eine andere Erklärung dafür, wie die Mikrotektite in die älteren Kreideablagerungen gelangt sind. Seiner Ansicht nach hat der Einschlag gewaltige Tsunamis und untermeerische Rutschungen ausgelöst und dadurch die geologischen Verhältnisse weithin durcheinander gebracht.

Debatte um die Kratergröße

Auch die Ergebnisse der Bohrung selbst, die etwa sechzig Kilometer vom Zentrum des Kraters entfernt abgeteuft wurde, deuten Keller und Kollegen völlig anders als das Gros der Wissenschaftler. Der Bohrmeißel durchschnitt zunächst einen 795 Meter mächtigen Block aus Sedimenten, die sich in den vergangenen 65 Millionen Jahren über den Krater gelegt haben. Darunter folgt die eigentlich interessante Schicht: eine hundert Meter dicke Lage aus geschmolzenem und dann zu Glas erstarrtem Gestein, durchsetzt mit nicht oder nur teilweise geschmolzenen Trümmern. Dieser »Impaktit« entstand aus der zentralen Glutwolke, die nach dem Einschlag in die Atmosphäre aufstieg und dann in sich zusammenbrach. Das glühend heiße Auswurfmaterial stürzte zur Erde zurück und bedeckte den Krater und seine Umgebung.

Unter dem Impaktit stießen die Forscher dann bis zum Abbruch der Bohrung in 1511 Meter Tiefe auf Sedimente aus der Kreidezeit – Kalkstein, Dolomit und Anhydrit (wasserfreier Gips) –, wie sie auch aus der Umgebung des Kraters bekannt sind. Um diese wenig gestörten Schichten entspann sich die Auseinandersetzung.

Bei einem Einschlag bohrt sich das kosmische Geschoss innerhalb von Sekunden in die Erde und erzeugt zunächst ein schmales Loch, dessen Tiefe bei Chicxulub auf dreißig Kilometer geschätzt wird. Während der Auswurf von verdampftem, geschmolzenem und zerbrochenem Gestein beginnt, federt der Boden zurück. Später rutschen von den Seiten her große Schollen in den primären Krater und erweitern ihn, wobei mehrere konzentrische Ringstrukturen entstehen. Die auf dem Kongress in Nördlingen umstrittene Frage: Gehören die Kreide-Sedimente auf den untersten 615 Metern der Bohrung zu einer abgerutschten Scholle?

Der Impakt-Experte Dieter Stöffler vom Museum für Naturkunde in Berlin räumt ein, dass er sich den Untergrund von Chicxulub stärker mitgenommen vorgestellt hatte. Doch ihm bereiten die vorgefundenen Verhältnisse kein Kopfzerbrechen. Sein Mitarbeiter Thomas Kenkmann hat anhand der Analyse seismischer Daten in Verbindung mit dem Bohrkern festgestellt, dass es sich um mehrere gegeneinander verstellte »Megablöcke« handelt.

Anders Dissident Stinnesbeck, der in Nördlingen auch im Namen von Keller und Adatte sprach. Seiner Ansicht nach ist das Kreide-Gestein in sechzig Kilometer Entfernung vom Kraterzentrum gar nicht gerutscht, sondern unberührt vom Impakt an Ort und Stelle geblieben. Wenn das stimmt, kann der Krater aber maximal 120 Kilometer weit sein. Gegen diese Annahme sprechen allerdings die Ergebnisse von seismologischen Untersuchungen und Schweremessungen. In einer neuen Veröffentlichung *(Proceedings of the National Academy of Science of the USA, 16.3. 2004, S. 3753)* geben Gerta Keller und ihre Kollegen die Kratergröße denn auch mit einem etwas höheren Wert von 145 Kilometern an.

Von der dadurch bewirkten Verwirrung abgesehen, werfen die Ansichten der Dissidentenfraktion zwei grundlegende Fragen auf. Einmal angenommen, der Chicxulub-Einschlag war nicht derjenige am Übergang zwischen Kreide und Tertiär. Auch in diesem Fall sollte er trotzdem heftig genug gewesen sein, um weltweite Spuren zu hinterlassen. Aber solche Zeugnisse wurden unterhalb des Grenztons bisher nirgends gefunden – weder eine iridiumreiche Schicht noch geschockte Quarze, Stishovit oder nickelreiche Spinelle. Warum nicht?

Kosmische Bomben im Doppelpack?

Außerdem rechnen Experten nur einmal alle 100 Millionen Jahre mit einer extrem heftigen kosmischen Kollision wie am Ende der Kreidezeit. Sollte es also innerhalb von nur 300 000 Jahren – nach geologischen Maßstäben ein Augenblick – gleich zwei solche Katastrophen gegeben haben, bei denen jeweils schlagartig die Energie von Millionen Wasserstoffbomben freigesetzt wurde? Die Wahrscheinlichkeit dafür ist sehr gering.

Man darf gespannt sein, wie die Debatte ausgeht. Bisher scheinen die Argumente der Dissidenten allerdings nicht überzeugend genug, um sich gegen die Belege der Gegenseite zu behaupten. Die Chancen auf einen Sieg der Abweichler stehen also eher schlecht. Doch in der Wissenschaft hat jeder die Chance, seine Sache zu vertreten, und immer wieder sind Ideen von Außenseitern zu Lehrmeinungen geworden. Dabei zählen im gelehrten Diskurs letztlich nur die stichhaltigeren Argumente. Keine Rolle spielt dagegen die Resonanz einer Hypothese in der breiteren Öffentlichkeit. Hier haben Gerta Keller und ihre Mitstreiter einige Publizität erlangt. Doch das erklärt sich wohl vor allem mit der Neigung der Medien, sich auf die Seite vermeintlicher Kämpfer gegen etablierte Meinungen zu schlagen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Erwin Lausch ist promovierter Biologe und freier Wissenschaftsjournalist mit Schwerpunkt auf den Geowissenschaften. Er lebt in Ahrensburg bei Hamburg.

Initial results of the Chicxulub Scientific Drilling Project (CSDP). Special edition of Meteoritics & Planetary Science, Bd. 39, Juni/Juli 2004

Chicxulub impact predates the K-T boundary mass extinction. Von G. Keller et al. in: Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, Bd. 101, S. 3753; 16.3.2004

The global stratigraphy of the Cretaceous Tertiary boundary impact ejecta. Von J. Smit in: Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Bd. 27, S. 75; 1999

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Emmy Noether

»Meine Herren, eine Universität ist doch keine Badeanstalt!«

Die bedeutendste Mathematikerin des 20. Jahrhunderts überwand die Hindernisse, die ihr wegen ihres Geschlechts und ihrer jüdischen Abstammung in den Weg gelegt wurden. Als erste Frau in Deutschland begründete sie eine wissenschaftliche Schule.

Von Renate Tobies

Zu den grundlegenden Prinzipien der Physik zählen die Erhaltungssätze für Energie, Impuls und Drehimpuls. Eine weit reichende Theorie, die diese Sätze mit fundamentalen Eigenschaften der Raumzeit verbindet, verdanken wir der Mathematikerin Emmy Noether (1882–1935). Heute gehören die »Noether-Theoreme« zum Grundbestand der mathematischen Physik.

In merkwürdigem Kontrast zur Modernität ihrer Leistungen steht ihre Lebensgeschichte: Sie hatte sich als Frau gegen Widerstände einer Männergesellschaft durchzusetzen, die aus einer fernen Vergangenheit zu stammen scheinen, obgleich sie erst hundert Jahre zurückliegen. Eine weniger geniale Frau wäre, zumindest in Deutschland, an diesen Widerständen vermutlich gescheitert; die Mathematikerinnen, die es vor ihr zu einiger Bedeutung brachten, stammten durchweg aus dem Ausland (Kasten S. 75).

Nach einem durch manche Hindernisse verzögerten Studium fand Emmy Noether zunächst keine Anstellung und arbeitete ohne Bezahlung als Wissenschaftlerin. Erst nach dem Ende des Kaiserreichs kam sie zu offiziellen Würden, wenn auch nicht zu großem Reichtum. Sie wirkte als ungeheuer produktive Mathematikerin und inspirierte zahlreiche Schüler. Durch die Nationalsozialisten aus dem Amt getrieben, emigrierte sie 1933 in die USA. Ihr plötzlicher Tod zwei Jahre später beendete eine einzigartige wissenschaftliche Karriere.

Aus ärmlichen Verhältnissen hat Emmy Noether sich nicht emporarbeiten müssen. Ihr Vater Max Noether (1844–1921) stammte aus einer gut situierten jüdischen Familie von Eisengroßhändlern. Mit 14 Jahren an Kinderlähmung erkrankt, hatte er die wissenschaftliche Laufbahn einschlagen dürfen.

Emmy, die höhere Tochter

Max Noethers akademischer Lehrer Alfred Clebsch (1839–1872) gilt als Begründer der algebraischen Geometrie und erzielte herausragende Leistungen auf den Gebieten Invariantentheorie und Mechanik. Zu Clebschs bedeutenden Schülern zählen Felix Klein (1849–1925) und Paul Gordan (1837–1912); noch heute spielen die Clebsch-Gordan-Koeffizienten in der mathematischen Physik eine bedeutende Rolle.

Klein und Gordan setzten durch, dass Max Noether 1875 zum außerordentlichen Professor für Mathematik an die Universität Erlangen berufen wurde – was wegen der allgemeinen Widerstände gegen jüdische Wissenschaftler im 19. Jahrhundert nicht einfach war. Max Noether erhielt auch keinen weiteren Ruf mehr und wurde erst 1888 in Erlangen zum ordentlichen Professor ernannt.

Hier heiratete er 1880 die ebenfalls aus vermögenden jüdischen Verhältnissen stammende Ida Kaufmann (1852–1915). Der Wohlstand der Familie erlaubte es, auch der am 23. März 1882 geborenen Tochter Amalie Emmy ein Studium zu finanzieren und den weiteren Weg zu ebnen.

Emmy trat als Erstgeborene in die Fußstapfen ihres Vaters; ihr Bruder Alfred (1883–1918) studierte Chemie und promovierte 1910 in Erlangen. Ihr jüngster Bruder Gustav Robert (1889–1928) war geistig behindert. Den längsten gemeinsamen Weg ging Emmy mit Bruder Fritz (1884–1941), dessen Begabung in der angewandten Mathematik lag. Er promovierte 1909 an der Universität München bei Aurel Voß (1845–1931), ebenfalls einem Clebsch-Schüler, »Über rollende Bewegung einer Kugel auf Rotationsflächen«. Im Vergleich zur Schwester, die vor ihm promovierte, machte er – als Mann – schneller Karriere: 1911 an der Technischen Hochschule Karlsruhe habilitiert, wurde er dort 1918 außerordentlicher Professor und 1921 ordentlicher Professor an der Technischen Hochschule Breslau (heute Wrócław); vor den Nazis floh er in die Sowjetunion und fiel dort, zu Unrecht der Spionage verdächtigt, dem Stalin'schen Terror zum Opfer.

Emmy Noether beschritt zunächst ganz den Weg einer »höheren Tochter«. Von 1889 bis 1897 besuchte sie die Städtische Höhere Töchterschule Erlan-



NIEDERSÄCHSISCHE STAATS- UND UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK GÖTTINGEN; MIT FREUNDL. GENEHMIGUNG VON RENATE TOBIES

Im Alter von 33 Jahren war Emmy Noether bereits eine renommierte Mathematikerin. Aber eine angemessene Stelle bekam sie nicht, und nach Göttingen, ins Zentrum der Mathematik, wurde sie erst geholt, als ihre männlichen Kollegen im Ersten Weltkrieg dienten.

gens. Nach weiterer Schulbildung in Stuttgart absolvierte sie 1900 in Ansbach eine Prüfung für Lehrerinnen der französischen und der englischen Sprache mit sehr guten Noten. Nun ging sie jedoch nicht den üblichen Weg als Erzieherin.

Die bayerische Staatsregierung hatte am 28. März 1900, gerade rechtzeitig, verordnet, dass Lehrerinnen Vorlesungen der geistes- und der naturwissenschaftlichen Sektion der Philosophischen Fakultäten besuchen durften – soweit die jeweiligen Professoren keine Einwände erhoben. So konnte sich Emmy Noether an der Universität Erlangen einschreiben. Die Zahl der Hörerinnen blieb zunächst gering; im Wintersemester 1902/03 waren es an der ganzen Universität zehn, im darauf folgenden Sommersemester nur drei. Emmy Noether eignete sich hier die notwendigen Kenntnisse an, um das Abitur an einem Knabengymnasium ablegen zu können. Als Externe absolvierte sie am 14. Juli 1903 die Reifeprüfung am königlichen Realgymnasium in Nürnberg. Während ihre Brüder einen zügigen Weg zum Abitur am Erlanger Knabengymnasium nahmen (Alfred 1902, Fritz 1903), gab es damals keinen Unterricht in Mathematik und Naturwissenschaften an Mädchenschulen; dieser wurde in Preußen als erstem deutschem Land 1908 und in Bayern erst 1910 eingeführt.

Immerhin hätte Emmy Noether unmittelbar nach dem Abitur ein Studium in ihrer Heimatstadt aufnehmen können, denn just im September desselben Jahres verfügte Bayern als zweites deutsches Land nach Baden (1900) die volle Immatrikulation für Frauen. Dreißig Studienanfängerinnen nutzten auf der Stelle die neue Freiheit – unter ihren 6851 männlichen Kommilitonen an den damaligen drei bayerischen Landesuniversitäten München, Würzburg und Erlangen eine verschwindende Minderheit. In Erlangen, der kleinsten Universität, war unter 982 Immatrikulierten nur eine Frau. Emmy Noether war es nicht; sie wandte sich nach Göttingen. Dort konnte sie sich zwar nicht offiziell als Studentin einschreiben – diese Möglichkeit eröffnete Preußen den Frauen als vorletztes deutsches Land erst 1908; aber in Göttingen war das Lehrangebot breiter, und sie war nicht die einzige Frau in den Vorlesungen.

Göttingen, das internationale Zentrum der Mathematik

Felix Klein, der erwähnte Studienfreund und Kollege ihres Vaters, und David Hilbert (1862–1943) hatten um 1900 in Göttingen das herausragende internationale Zentrum der Mathematik geschaffen; mit den »Mathematischen Annalen« gaben sie eine der wichtigsten Zeitschriften heraus. Hilbert zählte zu dieser Zeit zu den bedeutendsten Mathematikern der Welt, während Klein – 51 Jahre alt – sich stärker um die Entwicklung der angewandten Mathematik und des mathematischen Unterrichts, einschließlich besserer Bedingungen für den Unterricht an den höheren Mädchenschulen, kümmerte. Beide hatten in Göttingen seit den 1890er Jahren das Frauenstudium gefördert und bereits mehrere Mathematikerinnen zum Doktortitel geführt.

Damit waren die Mathematiker allgemein und die Göttinger Mathematiker insbesondere ihren Landsleuten um Jahrzehnte voraus. In Deutschland herrschte lange Zeit die Ansicht, dass Mathematik nichts für Frauen sei. Der Neurologe Paul Möbius (1853–1907), heute vor allem als Verfasser des Buchs »Über den physiologischen Schwachsinn des Weibes« berüchtigt, drückte das in seinem viel verlegten Buch »Über die Anlage zur Mathematik« (1900) wie folgt aus: »Man ▷

kann also sagen, dass ein mathematisches Weib wider die Natur sei, im gewissen Sinne ein Zwitter. Gelehrte und künstlerische Frauen sind Ergebnisse der Entartung. Nur durch Abweichung von der Art, durch krankhafte Veränderung, kann das Weib andere Talente, als die zur Geliebten und Mutter befähigenden, erwerben.«

Promotion beim »König der Invariantentheorie«

Nach einem Semester Auszeit wegen Krankheit setzte Emmy Noether im Herbst 1904 ihre Studien in Erlangen fort und beendete diese 1908 formal mit der Verteidigung ihrer mathematischen Dissertation »Über die Bildung des Formensystems der ternären biquadratischen Form«. Es handelte sich um ein Thema aus der algebraischen Invariantentheorie (Kasten unten).

Diese Theorie wurde Ende des 19. Jahrhunderts durch viele Mathematiker herausgebildet und zu einer ersten Blüte gebracht. Emmy Noethers Doktorvater Paul Gordan galt als »König der Invariantentheorie«. Er war an der Entwicklung einer symbolischen Methode beteiligt, mit der man Invarianten wirklich ausrechnen konnte, was Emmy Noether in ihrer Dissertation auch tat.

Ihr Werk erschien in einer mathematischen Zeitschrift – sehr ungewöhnlich in der damaligen Zeit und zweifellos nicht auf väterliche Protektion zurückzuführen, denn die Zeitschrift war das »Journal für die reine und angewandte Mathematik (Crelle's Journal)« und nicht etwa die durch Clebsch begründeten »Mathematischen Annalen«, deren Redaktion ihr Vater angehörte. Die mündliche Doktorprüfung (Hauptfach Mathematik, Nebenfächer Physik und romanische Philologie) absolvierte Emmy Noether am Freitag, den 13. Dezember 1907, mit der Bestnote »summa cum laude«. Damit war sie die zweite in Deutschland geborene Mathematikerin – nach einer Frau in Heidelberg –, die an einer deutschen Universität promovierte; in Göttingen hatten vor Noether bereits sieben Ausländerinnen (vier aus Russland, zwei aus den USA und eine Engländerin) die Hürde genommen.

Nach der Promotion arbeitete Emmy Noether zunächst einige Jahre ohne Anstellung in Erlangen. Maßgeblich angeregt durch den Mathematiker Ernst Fischer (1875–1954), knüpfte sie nach ihrer Dissertation an Ergebnisse Hilberts an und wurde so schließlich wegbereitend für die theoretische Physik und die moderne Algebra.

Hilbert hatte bereits 1890 ein klassisches Problem der Invariantentheorie mit abstrakten Methoden gelöst. Zehn Jahre später zählte er dieses Gebiet zu den Feldern der Mathematik, auf denen er bedeutende Fortschritte erwartete. In seiner berühmten und äußerst einflussreichen Liste von 23 bis dahin ungelösten Problemen, die er auf dem II. Internationalen Mathematiker–Kongress 1900 in Paris vortrug, betraf Nummer 14 eine Frage aus der Invariantentheorie. Ihr wandte sich nun Emmy Noether zu.

Durch ihren Vater in die Gemeinschaft der Mathematiker eingeführt, fand sie mit ihren Arbeiten bald Aufmerksamkeit. Die Liste der Vortragenden auf den jährlichen Tagungen der Deutschen Mathematiker-Vereinigung (DMV) legt davon beredtes Zeugnis ab.


WIE S. 71

Während sie 1909 noch ein Ergebnis aus der formalen Invariantentheorie präsentierte, ließ vier Jahre später ihr nächster Vortrag »Über rationale Funktionenkörper« erkennen, dass sie inzwischen in die maßgeblich von Hilbert initiierte abstrakte Algebra in arithmetischer Auffassung eingedrungen war. Dieser Aufsatz erschien als ihr erster – von vielen weiteren – in den »Mathematischen Annalen« und wurde 1915 von Hilbert als Habilitationsschrift empfohlen.

Drei Anläufe zur Habilitation

Auf die Dauer wäre die Erlanger mathematische Fakultät für ihre weitere Laufbahn nicht hilfreich gewesen. Sie war schlicht zu klein: Zwischen 1907 und 1945 promovierten dort nur 26 Personen in Mathematik, darunter eine weitere Frau (1936), in Göttingen dagegen im selben Zeitraum ungefähr 160. Für Emmy Noethers Weg wurde entscheidend, dass sie in einem Zentrum höchster Produktivität Fuß fassen konnte.

Zum Sommersemester 1915 kam sie auf Wunsch Kleins und Hilberts – als Ersatz für die im Ersten Weltkrieg dienenden Privatdozenten – nach Göttingen. Die dortigen Mathematiker beantragten die Habilitation für sie; und der bereits emeritierte Klein gab in einem Brief an das preußische Kultusministerium die folgende Einschätzung ab: »… dass Frl. Noether den Anforderungen, die wir bei einer Habilitation an den Bewerber zu stellen pflegten, durchaus genügt, ja die mittlere Qualität der Kandidaten, die wir in den letzten Jahren zugelassen haben, übertrifft.«

Das Vorhaben schlug zunächst fehl, obgleich Emmy Noether auch die anderen Göttinger Mathematiker schnell von

Algebraische Invarianten

Ein Beispiel für eine algebraische Invariante ist das Polynom $x_1x_2x_3 + x_1x_2x_4 + x_1x_3x_4 + x_2x_3x_4$, denn es ist invariant (bleibt unverändert) unter jeder Vertauschung der Variablen x_1, x_2, x_3 und x_4. Allgemein ist eine algebraische Invariante ein Polynom, das heißt, eine Summe von Ausdrücken der Form Konstante mal Produkt von Potenzen der Variablen, das unter gewissen Transformationen seiner Variablen invariant ist.

Es gibt Beziehungen unter den algebraischen Invarianten; so kann man komplizierte Invarianten aus einfachen zusammensetzen. Hilberts »Endlichkeitssatz« von 1890 ist ein sehr weit reichendes Resultat über eine derartige Zusammensetzbarkeit.

Algebraische Invarianten sind bis heute Gegenstand intensiver Forschung. Wenn ein Problem – das durchaus den Materialwissenschaften oder der Bildverarbeitung entstammen kann – durch Polynome ausdrückbar ist, dann kann man gewisse Symmetrieeigenschaften des Problems mit Hilfe algebraischer Invarianten ausdrücken und dadurch das Problem erheblich vereinfachen.


DEUTSCHES MUSEUM MÜNCHEN


GÖTTINGER MATHEMATISCHES INSTITUT; MIT FREUNDL. GENEHMIGUNG VON RENATE TOBIES


WIE S. 71

Der echte und die wissenschaftlichen Väter: Max Noether, Paul Gordan, Felix Klein (Gemälde von Max Liebermann, 1912) und David Hilbert

ihrer Leistungsfähigkeit überzeugt hatte. Preußen hatte nämlich durch Erlass vom 29. Mai 1908 den Frauen die Habilitation untersagt, und zwar kurioserweise indem es in einem ungewöhnlich demokratischen Akt dem Willen seiner Untertanen folgte. Nachdem 1907 die Bonner Biologin Maria Gräfin von Linden (1869–1936) die Aufnahme in den illustren Kreis der Lehrbefähigten beantragt hatte, holte das Kultusministerium in einer Rundfrage die Meinung der Universitätsprofessoren zur Frage der Frauen-Habilitation ein; die Mehrheit sprach sich dagegen aus.

Die Göttinger Mathematiker, die schon damals dafür gestimmt hatten, erreichten 1915 ebenso wie bei einem zweiten Anlauf 1917 keine Ausnahme für Emmy Noether. Aus den heftig geführten Debatten innerhalb der eigenen Universität ist der Ausspruch Hilberts überliefert: »Aber meine Herren, wir sind doch in einer Universität und nicht in einer Badeanstalt!« (In einer Badeanstalt waren damals Frauen und Männer in der Regel noch getrennt.) Immerhin konnte Hilbert, als er 1917 einen Ruf nach Berlin hatte, in den Bleibeverhandlungen durchsetzen, dass er Vorlesungen »unter Mitwirkung von Frl. Dr. Noether« ankündigen durfte.

Noch während des Ersten Weltkriegs begannen die Göttinger Mathematiker, Emmy Noether eingeschlossen, sich mit den neuesten Ideen der theoretischen Physik auseinander zu setzen. Im Jahre 1915 hatte Albert Einstein (1879–1955) seine Allgemeine Relativitätstheorie veröffentlicht und damit bei seinen eigenen Fachkollegen zunächst Skepsis, bei den Mathematikern jedoch große Begeisterung geerntet. Typisch ist der Ausspruch, den der Göttinger Physiker Eduard Riecke (1845–1915) bereits 1911 formulierte: »Die mathematiker sind von der eleganz der rechnungsregeln hypnotisiert, die physiker kritisch.« Dass der Raum gekrümmt sein könnte, konnte die Mathematiker, die durch die Schule der nicht-euklidischen Geometrie gegangen waren, nicht ernstlich schrecken. Sie trugen, wie es Klein ausdrückte, »die neuen Gedankenreihen vermöge ihrer invariantentheoretischen (oder geometrischen) Untersuchungen, wenn auch in anderer Form, ohne es zu wissen, bereits fertig in sich herum«.

Hilbert hielt im Sommersemester 1916 eine Vorlesung über Grundlagen der Physik; Klein beschäftigte sich ab diesem Zeitpunkt ebenfalls intensiver damit, begann ab März 1917 eine Korrespondenz mit Einstein und gestaltete Vorlesungen und Vortragsreihen zur Allgemeinen Relativitätstheorie. Sowohl Hilbert als auch Klein bedankten sich in ihren entsprechenden Publikationen bei Emmy Noether und betonten, dass sie ohne ihre Hilfe nicht hätten in den Gegenstand eindringen können.

Aus dieser engen Zusammenarbeit resultierte Noethers Arbeit »Invariante Variationsprobleme«, die Felix Klein am 26. Juli 1918 in der Sitzung der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen (heute »Göttinger Akademie der Wissenschaften«) vorlegte. Einstein schrieb dazu am 27. Dezember 1918 an Felix Klein: »Beim Empfang der neuen Arbeit von Frl. Noether empfand ich es wieder als grosse Ungerechtigkeit, dass man ihr die venia legendi vorenthält. Ich wäre sehr dafür, dass wir beim Ministerium einen energischen Schritt unternähmen.« Daraufhin wandte sich Klein am 5. Januar 1919 an Ministerialdirektor Naumann in Berlin: »Bei den heutigen Zeitumständen kann es in der Tat nicht fehlen, dass die jetzige Stellung von Frl. Noether von vielen Seiten als eine unbillige Einengung empfunden wird, zumal die wissenschaftliche Leistung von Frl. Noether alle von uns gehegte Voraussicht weit übersteigt. Sie hat im letzten Jahre eine Reihe theoretischer Untersuchungen abgeschlossen, die oberhalb aller im gleichen Zeitraum von Anderen hierorts realisierten Leistungen liegen (die Arbeiten der Ordinarien mit eingeschlossen).«

Die Noether-Theoreme

Am 8. Mai 1919 verfügte das Ministerium für Wissenschaft, Kunst und Volksbildung, wie es jetzt während der Weimarer Republik hieß, dass es keine Einwände gegen die Habilitation Emmy Noethers erhebe. Die erwähnte Arbeit von 1918, in der sie die berühmten Noether-Theoreme formulierte, wurde als Habilitationsschrift anerkannt. Damit erreichte sie endlich die lang erstrebte Lehrbefugnis – mit Ausnahmegenehmigung, denn das Gesetz, das die Zulassung nicht mehr an das Geschlecht der Person band, trat erst am 21. Februar 1920 in Kraft.

Bereits kurz nach Erscheinen der Arbeit »Invariante Variationsprobleme« griffen Einstein, Hilbert, Hermann Weyl (1885–1955) und andere ihre Ergebnisse auf. Diese sind zwar von mathemati- ▷



Vier bekannte Mathematikerinnen beim Internationalen Mathematikerkongress in Zürich 1932: Olga Taussky, Frau Köthe, Emmy Noether und Ruth Moufang

scher Art, haben aber wesentliche Konsequenzen für die theoretische Physik – so sehr, dass sie mittlerweile zum Grundbestand dieser Wissenschaft zählen. Als Folgerung aus ihren Sätzen konnte Emmy Noether eine Vermutung Hilberts über das Versagen »eigentlicher Energiesätze« in der Allgemeinen Relativitätstheorie beweisen (Kasten S. 76).

Die Noether-Theoreme prägen vor allem deshalb die moderne Physik, weil sie drei große Prinzipien miteinander verbinden: Symmetrien, Erhaltungssätze und Variationsprinzipien. Jedes dieser Prinzipien hat eine eigene Geschichte.

- Die physikalische Welt weist *Symmetrien* auf, das heißt, die grundlegenden Gesetze der Physik sind unter bestimmten Transformationen invariant (unverändert): Das physikalische Verhalten eines abgeschlossenen Systems ändert sich nicht, wenn man das ganze System an einen anderen Ort im Raum bringt oder verdreht. Das Gleiche gilt für Zeitverschiebungen: Ein physikalischer Prozess, zum Beispiel ein Experiment, läuft unverändert ab, wenn man ihn zu einem späteren Zeitpunkt wiederholt.
- *Erhaltungssätze* drücken aus, dass bestimmte Quantitäten wie Masse, Impuls, Energie und elektrische Ladung erhalten bleiben in dem Sinne, dass sie nicht spurlos verschwinden, sondern höchstens ihre Erscheinungsform verändern. Erhaltungssätze sind ein entscheidendes Hilfsmittel, sich in der physikalischen Welt zurechtzufinden. Der Energieerhaltungssatz, durch Julius Robert Mayer (1814–1878) erstmals ausgesprochen, durch James P. Joule (1818–1889) experimentell und durch Hermann Helmholtz (1821–1894) mathematisch begründet, war ein Markstein in der Geschichte der Physik; weitere Erhaltungssätze folgten.
- *Variationsprinzipien* wurden erstmals von Gottfried W. Leibniz (1646–1716) und Pierre L. M. de Maupertuis (1698–1759) aufgestellt. Die beiden Wissenschaftler hatten bemerkt, dass beispielsweise ein Lichtstrahl von allen denkbaren Wegen von *A* nach *B* denjenigen mit dem kürzesten Zeitaufwand nimmt, und zwar auch dann, wenn er unterwegs gebrochen wird, weil *A* in der Luft und *B* im Wasser liegt. Allgemein lässt sich häufig eine gewisse Größe konstruieren, die beim tatsächlichen physikalischen Ablauf – verglichen mit anderen denkbaren Abläufen – minimal oder auch maximal, jedenfalls extremal wird.

Spartanisches Leben in der Mansardenwohnung

Dieses »Prinzip der kleinsten Wirkung« erhielt 1834 im Hamilton'schen Prinzip seine heute noch gültige Form. Das Variationsprinzip reduziert die relevante physikalische Information auf eine einzige Funktion, das so genannte Wirkungsintegral, und besagt, dass die Vorgänge in einem gewissen Sinne »mit kleinstmöglichem Aufwand« ablaufen.

Emmy Noether bewies, dass aus einer kontinuierlichen Symmetrie auf dem Weg über ein Variationsprinzip ein Erhaltungssatz folgt und umgekehrt. Insbesondere folgt aus der Invarianz des Wirkungsintegrals unter Zeitverschiebung die Erhaltung der Energie; aus der Invarianz des Wirkungsintegrals unter räumlichen Translationen folgt die Erhaltung des Impulses.

Obgleich sich Frauen seit 1920 habilitieren durften, war ein Weg zur beamteten Professur nicht sofort in jedem deutschen Land möglich. Die ersten zwei ordentlichen Professorinnen wurden 1923 in Jena (Thüringen) und Stuttgart-Hohenheim (Württemberg) ernannt. Das preußische Abgeordnetenhaus jedoch diskutierte noch 1928 darüber, ob man Frauen nicht wenigstens ein verbeamtetes Extraordinariat zugestehen solle. Eine Entscheidung fiel nicht, und demnach wurde Frauen in Preußen nur der Titel, nicht aber das Amt zugestanden.

Emmy Noether wurde im April 1922 zum »nichtbeamteten außerordentlichen Professor« ernannt, nachdem sie seit 1919 Lehrveranstaltungen unter ihrem eigenen Namen angeboten hatte. In dem entsprechenden Antrag schrieb die Göttinger mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät, Emmy Noether übe »auf die begabten Studenten eine starke wissenschaftliche Anziehungskraft aus und hat viele von ihnen wesentlich gefördert, darunter auch solche, die inzwischen Ordinariate erreicht haben«.

Ihr Professoren-Titel war nicht mit einem Gehalt verbunden. Sie lebte von einer kleinen Erbschaft, die allerdings 1923 durch die Inflation vernichtet wurde. Seit dem Sommersemester 1923 erhielt sie erstmals mit einem Lehrauftrag für Algebra – der für jedes Semester neu beantragt werden musste – geringe finanzielle Einkünfte von der Universität. Dies reichte für ein spartanisches Leben in einer Mansardenwohnung. Emmy Noether lebte für die Mathematik.

Ihre Präsenz in nationalen und internationalen Gemeinschaften war Ausdruck ihrer Kreativität. In der Göttinger Mathematischen Gesellschaft gehörte sie zu den am häufigsten Vortragenden. Von 1920 bis 1925 hatte sie auch auf jeder Jahresversammlung der Deutschen Mathematiker-Vereinigung (DMV) etwas Neues zu berichten. Dass sie eingeladen wurde, 1922 für die DMV einen Bericht

über »Algebraische und Differentialinvarianten« zu erstatten, zeugt von besonderer Anerkennung durch ihre Fachkollegen. Auf dem Internationalen Mathematiker-Kongress 1928 in Bologna, an dem – erstmals nach dem Ersten Weltkrieg – deutsche Mathematiker wieder teilnehmen durften, präsentierte sie Ergebnisse ihrer neuen Forschungsrichtung »Hyperkomplexe Größen«; auf dem nächsten derartigen Kongress 1932 in Zürich wurde sie bereits zu einem Hauptvortrag darüber gebeten. Zahlreiche Einladungen zu auswärtigen Vorträgen belegen, dass man ihre Leistungen und ihre Fähigkeit zur Kooperation zu schätzen wusste, desgleichen zwei Gastprofessuren 1928/29 in Moskau und 1930 eine Vertretung des bedeutenden Zahlentheoretikers Carl Ludwig Siegel (1896–1981) in Frankfurt am Main.

Von ihren vielen Kooperationspartnern sei an dieser Stelle noch der in Wien geborene Emil Artin (1898–1962), Professor in Hamburg, hervorgehoben. Die Kreise um Noether und Artin pflegten einen engen wissenschaftlichen und persönlichen Kontakt. Beide wurden 1932 gemeinsam mit dem Alfred-Ackermann-Teubner-Gedächtnispreis ausgezeichnet; damit bescheinigte ihnen die Fachwelt, dass sie in den 1920er Jahren die bedeutendsten Leistungen auf den Gebieten Arithmetik und Algebra erzielt hatten.

Noethers Schule der Modernen Algebra

Emmy Noether verfolgte ein eigenes fruchtbares Forschungsprogramm, an dem sich zahlreiche Fachkollegen beteiligten. Der Niederländer Bartel L. van der Waerden (1903–1996), einer ihrer bedeutendsten Schüler, brachte 1930/31 zwei Bände »Moderne Algebra« heraus, die auf Vorlesungen von Noether und Artin fußten und zahlreiche Auflagen erlebten. Darin sowie in den durch Noether angeregten Bänden »Algebren« (1935) von Max Deuring (1907–1984) und »Idealtheorie« (1935) von Wolfgang Krull (1899–1971) sind wichtige Ergebnisse der Noether-Schule zusammengefasst.

Ihr als »begriffliche Mathematik« bezeichnetes Herangehen war von Richard Dedekind (1831–1916) geprägt, der erstmals die Gemeinsamkeiten algebraischer Strukturen verschiedener Herkunft in Begriffe wie Ideal, Ring und Körper ▷

Bedeutsame Mathematikerinnen

Bild	Name	Beschreibung
Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen. CORBIS-BETTMANN	**Hypatia** * um 370 Alexandria † 415 Alexandria	Die berühmteste Wissenschaftlerin, Philosophin und Mathematikerin der Antike verfasste unter anderem Kommentare zur Kegelschnittlehre des Apollonius, zur Arithmetik des Diophant sowie zum astronomischen Hauptwerk des Ptolemaios.
Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen. BRIDGEMAN-GIRAUDON	**Gabrielle-Émilie le Tonnelier de Breteuil, Marquise du Châtelet** * 17.12.1706 Paris † 10.9.1749 Lunéville	Sie ging als Geliebte von Voltaire in die Geschichte ein. Als ihre bedeutendste Leistung gilt die Übersetzung und mathematische Kommentierung von Newtons Hauptwerk »Philosophiae naturalis principia mathematica«.
Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen. CORBIS-BETTMANN	**Maria Gaetana Agnesi** * 16.5.1718 Mailand † 9.1.1799 Mailand	Sie trieb die Differenzial- und Integralrechnung voran und lieferte originäre Beiträge für die Untersuchung von Kurven. Papst Benedikt XIV. ernannte sie 1750 zur Professorin in Bologna; den ihr zugedachten Lehrstuhl besetzte sie jedoch nicht.
Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen. BRIDGEMAN-GIRAUDON	**Sophie Germain** * 1.4.1776 Paris † 27.6.1831 Paris	Die bedeutende Zahlentheoretikerin, Autodidaktin, korrespondierte unter Pseudonym mit Carl Friedrich Gauß, der ihre Leistungen schätzte und sie für ein Ehrendiplom in Göttingen vorschlug (Spektrum der Wissenschaft 2/1992, S. 80).
Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen. BRIDGEMAN-GIRAUDON	**Mary Somerville, geb. Fairfax, verwitwete Greig** * 26.12.1780 Jedburgh (Schottland) † 19.11.1872 Neapel	Mit Büchern zur Himmelsmechanik, Physik und Geologie erreichte sie internationale Anerkennung. Ihr wichtigstes von vier Büchern war eine Übersetzung von Laplaces »Méchanique céleste« (1831).
Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen. BRIDGEMAN-GIRAUDON	**Ada Auguste Countess of Lovelace, geb. Byron** * 10.12.1815 London † 27.11.1852 London	Sie schrieb die ersten Programme für die von Charles Babbage (1792–1871) konzipierte »Analytical Engine«, mit der unter anderem lineare Gleichungssysteme gelöst werden konnten (Spektrum der Wissenschaft 4/1993, S. 78).
 AUS: ACTA MATHEMATICA 16, 1892/93	**Sofja Kowalewskaja, geb. Korwin-Krukowskaja** * 15.1.1850 Moskau † 10.2.1891 Stockholm	Als Schülerin des Berliner Mathematikers Karl Weierstraß promovierte sie 1874 *in absentia* an der Universität Göttingen; sie leistete bedeutende Beiträge zur klassischen Mechanik, insbesondere zur Kreiseltheorie.

fasste. In den Worten van der Waerdens: »Die Maxime, von der sich Emmy Noether immer hat leiten lassen, könnte man folgendermaßen formulieren: Alle Beziehungen zwischen Zahlen, Funktionen und Operatoren werden erst dann durchsichtig, verallgemeinerungsfähig und wirklich fruchtbar, wenn sie von ihren besonderen Objekten losgelöst und auf allgemeine begriffliche Zusammenhänge zurückgeführt werden.«

Dieses Herangehen war nicht nur für die Algebra fruchtbar, sondern für zahlreiche weitere Gebiete. Helmut Hasse (1898–1979), der Emmy Noether als seine »Lehrmeisterin« hinsichtlich »der begrifflichen Durchdringung und invarianten Gestaltung algebraischer Sachverhalte« bezeichnete, beschrieb bereits 1929 den weit reichenden Einfluss der modernen Algebra: »Wie schon angedeutet, ist die moderne algebraische Methode keineswegs auf den klassischen Bestand der Algebra beschränkt, sondern greift darüber hinaus und durchsetzt eigentlich die ganze Mathematik. Überall kann man ihr Prinzip anwenden, die einfachsten begrifflichen Grundlagen für eine vorliegende Theorie aufzusuchen und dadurch vereinheitlichend und systematisierend zu wirken …«

Höchste Mathematik mit Pudding

Emmy Noether hatte bereits vor 1919 Dissertationen angeregt; zwei ihrer Schüler promovierten schon in Erlangen. Seit 1925 durfte sie in Göttingen als Hauptreferentin bei den Promotionsverfahren mitwirken und ihre Schüler selbst beim Doktorexamen prüfen, was normalerweise ordentlichen Professoren vorbehalten war. Ihr Schülerkreis – die »Noether-boys« – reichte bis nach Frankreich, Japan, in die Sowjetunion und die USA.

Ihre Schüler und Freunde rühmten nicht nur die mathematische Förderung, die sie erfuhren, sondern auch ihre Güte und ihre Gastfreundschaft. Berühmt, geradezu sprichwörtlich waren gewaltige Schüsseln von Pudding, bei dessen Verzehr in ihrer Mansardenwohnung höchste Mathematik getrieben wurde, ebenso wie bei ausgedehnten Wanderungen zu einem nahe gelegenen Gasthof sowie im Göttinger Stadtbad.

Im Rahmen unseres jüngsten, von der Volkswagenstiftung geförderten Forschungsprojekts konnten wir drei bisher unbekannte deutsche Promovenden ausfindig machen. Insgesamt hat Emmy Noether mindestens 18 Personen, darunter zwei Frauen, zur Doktorwürde geführt, und das mit außergewöhnlich guten Ergebnissen: Fünfzehn von ihnen erzielten eine der Bestnoten, »summa cum laude« oder »magna cum laude«. Mehr als die Hälfte ihrer direkten Schüler schlug eine wissenschaftliche Karriere ein und konnte damit eine Generation von Noether-Enkeln heranziehen.

Dass Emmy Noether ihre Enkel-Generation selbst bewusst wahrnahm und

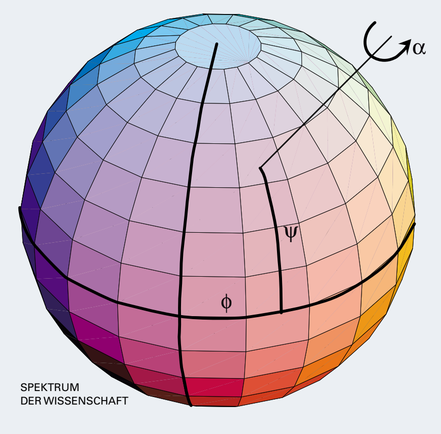
Symmetriegruppen und Erhaltungssätze

Eine Kugel ist symmetrisch bezüglich aller Drehungen um ihren Mittelpunkt, denn sie geht aus jeder dieser Drehungen unverändert (»invariant«) hervor. Alle Drehungen um diesen Punkt heißen daher Symmetrietransformationen der Kugel. Es gibt unendlich viele von ihnen; jede wird durch drei reelle Zahlen, die »Parameter«, beschrieben: eine für den Drehwinkel und zwei für die Lage der Drehachse (Bild).

Zusammen bilden diese Drehungen eine Gruppe, denn jede von ihnen ist umkehrbar, und zwei Drehungen hintereinander ergeben wieder eine Drehung. Darüber hinaus ist diese Gruppe kontinuierlich, das heißt, eine beliebig kleine Veränderung der Parameter ergibt ein neues, beliebig wenig unterschiedliches Element der Gruppe.

Die Gruppe der Verschiebungen im Raum und in der Zeit ist ebenfalls kontinuierlich; die Parameter sind die Komponenten des Verschiebungsvektors.

Da es insbesondere beliebig kleine Verschiebungen und Drehungen gibt – allgemeiner: Transformationen, die beliebig wenig von der Identität abweichen –, kann man in kontinuierlichen Gruppen Differenzialrechnung betreiben: Man betrachte die Änderung einer physikalischen Größe unter einer Transformation



Eine Drehung im Raum wird beschrieben durch den Drehwinkel α sowie geografische Länge ϕ und Breite ψ der Drehachse.

und lasse diese Transformation gegen die Identität streben. Aus den Ergebnissen kann man mit Hilfe der Analysis, genauer: der Variationsrechnung, Schlüsse ziehen. Das ist die wesentliche Idee zum Beweis der Noether-Theoreme.

Es gibt kontinuierliche Gruppen, die nicht nur von endlich vielen Zahlen parametrisiert werden, sondern in denen die Parameter selbst Funktionen sein dürfen. Eine solche unendlich-dimensionale Gruppe bilden die Eichtransformationen in der Quantentheorie. Für sie gilt ein weiteres Noether-Theorem, das etwas anders zu formulieren und zu beweisen ist. Es liefert zum Beispiel die Erhaltung der elektrischen Ladung, als Konsequenz der Eichinvarianz des Wirkungsintegrals der Elektrodynamik.

Der Unterschied zwischen endlich- und unendlich-dimensionalen Transformationsgruppen hat Konsequenzen für die Physik. In der Allgemeinen Relativitätstheorie gibt es zwar auch einen Energieerhaltungssatz, aber keine lokalisierbare Energie mehr. In klassischen Theorien gibt es die in einem Raumgebiet enthaltene Energiemenge, die sich nur dadurch ändert, dass Energie über die Grenzen des Gebiets in das Gebiet hinein- oder aus ihm herausströmt. Daraus folgt unmittelbar der Energieerhaltungssatz. Solche »eigentlichen« Erhaltungssätze gibt es in der Allgemeinen Relativitätstheorie nicht mehr. Das Gravitationsfeld enthält zwar Energie, aber man weiß nicht mehr wo. Dass dies auf die unendliche Dimension der Transformationsgruppe zurückzuführen ist, hatte Hilbert vermutet und Emmy Noether in ihrer Arbeit »Invariante Variationsprobleme« bewiesen.

sehr stolz darauf war, geht aus einem Brief vom 5. März 1933 an einen ihrer engsten Mitarbeiter, den Topologen Pavel Sergejewitsch Alexandroff (1896–1982), hervor: »Ich freue mich sehr, dass jetzt bei Euch im Institut so schön gearbeitet wird; Du wirst Dir jetzt bald eine jüngere topologische Generation heranziehen, wo Pontrjagin und die übrigen mir Bekannten schon Elternstelle vertreten, du Dich also jugendlich Deiner Enkel erfreust. (›Ich höre, Sie fühlen sich Großmutter‹, sagte mir Fischer-Köln einmal in Bezug auf F. K. Schmidt-Erlangen).«

Wie viele weitere Wissenschaftler wurde auch Emmy Noether durch die Nazis – nach dem »Gesetz zur Wiederherstellung des Berufsbeamtentums« vom 7. April 1933 – aus ihrer Position gedrängt. Zwölf ihrer Schüler fanden sich damals zusammen, um gegen ihre Entlassung zu protestieren, wobei sie unter anderem hervorhoben: »Das Gebiet, das sie erforscht, die lebendigen Fragestellungen, die sie aufstellt, haben alle ihre Schüler mit Begeisterung und Leidenschaft für die Mathematik erfüllt.«

Jeden Dienstag zur Vorlesung nach Princeton

Emmy Noether emigrierte in die USA. Auf Grund eines Stipendiums der Rockefeller Foundation erhielt sie am berühmten Women's College Bryn Mawr eine befristete Position als Professorin.

In Göttingen hatte sie noch die dreibändige Edition der Werke Dedekinds abschließen und die Herausgabe der Korrespondenz Dedekinds mit Georg Cantor (1845–1918) auf den Weg bringen können. In den USA setzte sie eigene Forschungen fort – die allerdings nicht mehr zur Publikation gelangten. »Hier habe ich mir einiges Neue über galoissche Zahlkörper überlegt; es ist aber nicht ganz, was man sucht«, schrieb sie am 19. März 1934 an Alexandroff. Sie hielt engen Briefkontakt mit ihren Schülern und Kollegen in Deutschland und in anderen Ländern, bemühte sich weiter um Beiträge für die »Mathematischen Annalen«, nahm Einladungen zu wissenschaftlichen Vorträgen an und träumte von einer festen Position in Princeton (New Jersey).

Mit dem »Institute for Advanced Studies« der Princeton University – wo Albert Einstein und Hermann Weyl untergekommen waren – hatte Emmy



AUS BREWER/SMITH »EMMY NOETHER, A TRIBUTE TO HER LIFE AND WORK«, MIT FREUNDL. GENEHMIGUNG VON RENATE TOBIES

Emmy Noether (5. von rechts) wandert 1932 mit Schülern und Kollegen zum Gasthof Vollbrecht. Der Mann mit dem Hut ist Hermann Weyl.

Noether einen Vertrag über zwei Wochenstunden Vorlesung. Sie fuhr jeden Dienstag hin und lehrte das, was sie montags zuvor ihren Schülerinnen in Bryn Mawr beigebracht hatte. Im letzten erhaltenen Brief an Alexandroff schrieb sie am 3. Mai 1934, »dass ich mich einstweilen für überhaupt, trotz viel Verlockendem, für Moskau und für die Algebraprofessur, noch nicht binden will. Bis Herbst 1935 bin ich ja überhaupt noch hier verpflichtet; und für später haben sie mir jetzt in Princeton wieder gesagt, dass ich bleiben sollte. In welcher Form – ob weiter pendeln oder ganz dort – wissen sie wohl selbst noch nicht. Hier zu bleiben hat natürlich den großen Vorteil, dass man – trotz Dollardevaluation – in alle Himmelsgegenden reisen kann; vielleicht sind in dieser Hinsicht in Amerika meine Ansprüche gestiegen!«

Um Emmy Noethers Schülerinnen-Kreis zu fördern, war 1934 ein besonderes »Emmy Noether Fellowship« eingerichtet worden. Erste und einzige Empfängerin dieses Stipendiums war Grace Shover (verheiratete Quinn), die später Professorin für Mathematik und Statistik an der American University in Washington wurde. Zum Kreis um Noether in Bryn Mawr gehörten außerdem die bereits promovierten Olga Taussky und Marie Weiss sowie Ruth Stauffer (verheiratete McKee), deren Dissertation Emmy Noether anregte.

Der neue, erfolgreiche Start in den USA fand ein jähes Ende, als Emmy Noether am 14. April 1935 plötzlich und unerwartet an den Folgen einer Unterleibsoperation verstarb. In kurzer Zeit hatte sie jedoch einen neuen Schülerinnenkreis auf den Weg gebracht, »a new Noether family«, wie Grace Shover Quinn formulierte, der ihre Methoden in den USA fortpflanzen konnte.

In seiner Gedenkrede am 5. September 1935 in Moskau bezeichnete Pavel S. Alexandroff Emmy Noether als »die größte Mathematikerin, eine führende Wissenschaftlerin, wunderbare Lehrerin und einen unvergesslichen Menschen«. ◁

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE



Renate Tobies ist für Geschichte der Mathematik und Naturwissenschaften habilitiert und lehrte in Leipzig, Kaiserslautern, Göttingen, Oldenburg, Linz und Braunschweig. Sie ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik in Kaiserslautern und forscht hauptsächlich über die Geschichte der Mathematik des 19. und 20. Jahrhunderts.

Traumjob Mathematik! Berufswege von Frauen und Männern in der Mathematik. Von Andrea Abele, Helmut Neunzert und Renate Tobies. Birkhäuser, Basel 2004

Gesammelte Abhandlungen. Collected Papers. Von Emmy Noether. Von Nathan Jacobson (Hg.). Springer, Berlin 1983

Emmy Noether. A tribute to her life and work. Von James W. Brewer und Martha K. Smith. Marcel Dekker, New York 1981

Emmy Noether. Von Auguste Dick. Birkhäuser, Basel 1970

Weitere Literaturhinweise sowie Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

PHILOSOPHIE

Metamorphosen der Gerechtigkeit

Schleier des Nichtwissens: Der Moralphilosoph John Rawls widmete sein ganzes Werk dem Problem der Gerechtigkeit.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

John Rawls, geboren 1921 in Baltimore (Maryland), studierte ab 1939 an der Universität Princeton und promovierte 1950 mit einer Arbeit über die Beurteilung von Charakteren. Von 1964 an bis zu seinem Tod am 24. November 2002 war er Professor für Philosophie an der Harvard-Universität.

Von Hubertus Breuer

Der Weg zu einer Nachkriegsordnung im Irak ist äußerst mühsam. Schon die im März verabschiedete Übergangsverfassung kam nur unter den größten Schwierigkeiten zu Stande; und das endgültige Gesetzeswerk steht immer noch in Frage. Zu unterschiedlich sind die Interessen der beteiligten Gruppen: Die Vereinigten Staaten lehnen eine endgültige Verfassung ab, die den Islam zur Staatsreligion und zur Inspirationsquelle für Gesetze erhebt. Die Schiiten, größte Bevölkerungsgruppe im Land, beäugen einen föderalen Irak mit Skepsis. Die Kurden behalten sich ein Vetorecht gegen jegliche endgültige Verfassung vor.

Das Gezerre wird noch komplizierter dadurch, dass es keine allgemein anerkannten Verfahrensrichtlinien gibt. Welche Legitimität hat eine verfassunggebende Versammlung, die von der bisherigen Besatzungsmacht USA eingesetzt ist und kein Vertrauen beim Volk genießt? Auf welchen Grundsätzen darf eine Verfassung beruhen? Was ist letztlich gerecht?

Bei solchen Problemen zitieren Kommentatoren gerne John Rawls, der sich ein Leben lang mit dem Problem der Gerechtigkeit auseinander gesetzt hat. Als der Harvard-Professor 1971 die Studie »Eine Theorie der Gerechtigkeit« veröffentlichte (auf Deutsch 1975), traf es die akademische Öffentlichkeit wie ein Paukenschlag, und das Fach »Politische Philosophie« gewann mit einem Streich neues Ansehen. In dem Werk, dessen erste Anfänge bis 1955 zurückreichen, legte Rawls systematisch dar, wie eine Gesellschaft institutionell organisiert sein muss, um als »gerecht« zu gelten. Das Stück liest sich wie eine geniale Rechtfertigung liberaler Demokratie.

Im Zentrum steht ein verblüffendes Gedankenexperiment. Stellen wir uns einen Urzustand vor, in dem die Vertreter aller sozialen Gruppen einen Gesellschaftsvertrag aushandeln. Nur wissen die Repräsentanten nicht, wen sie eigentlich vertreten – es könnte jede soziale Gruppe sein. Sie sollen also den Kuchen schneiden, ohne zu wissen, welches Stück sie bekommen.

In diesem Falle, so spekuliert Rawls, werden die Unterhändler nicht nur für alle Bürger gleiche Rechte und die Freiheit fordern, einem in ihrem Sinne guten Leben nachzugehen. Sie werden auch soziale und wirtschaftliche Ungleichheiten aller Art nur dann akzeptieren, wenn sie auch den auf der untersten Sprosse der sozialen Leiter stehenden Menschen noch einen Vorteil bringen. Schließlich könnte es sein, dass der Stellvertreter gerade für diese Gruppe das Wort führen muss.

Damit wendet sich Rawls direkt gegen die utilitaristische Ethik, die im »größten Glück der größten Zahl« ihr Heil sucht, und sichert den Status von Schwachen und Minderheiten. Denn man könne »Institutionen nicht damit rechtfertigen, dass den Unbilden einiger ein größerer Gesamtnutzen gegenüberstehe. Es mag zweckmäßig sein, ist aber nicht gerecht, dass einige weniger haben, damit es anderen besser geht. Dagegen ist nichts Ungerechtes an den größeren Vorteilen weniger, falls es dadurch auch den nicht so Begünstigten besser geht«. Mit diesem Maßstab liefert Rawls gleichzeitig die moralphilosophische Rechtfertigung für einen freiheitlichen und sozialen demokratischen Rechtsstaat.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Zu dieser Zeit waren normative Fragen in den akademischen Zirkeln eigentlich außer Mode: In den angelsächsischen Ländern herrschten metaethische Debatten, in Kontinentaleuropa philosophiegeschichtliche Aufarbeitung vor. Aber der ebenso eingängigen wie streitbaren Argumentation von Rawls konnte man sich nicht verschließen. Erstmals debattierten Philosophen und Politikwissenschaftler die Inhalte der Ethik wieder direkt. Die »Theorie der Gerechtigkeit« war bald in aller Munde, sie mutierte gar zum Bestseller.

Das war der Beginn der Rawls-Industrie. Jeder hatte etwas beizutragen; Chef des Diskurses blieb jedoch der Meisterdenker selbst. Über zwanzig Jahre stand er dem Debattierklub vor, hörte sich geduldig Vorschläge an, integrierte vieles und verwarf manches. Gemeinsam mit seinen Anhängern verteidigte er seinen egalitären Liberalismus gegen kommunitaristische Tugendbolde, für die Gesellschaft nur als gewachsene Wertegemeinschaft funktioniert, ebenso wie gegen jene zügellosen Geister, für die das Boot den besten Kurs steuert, wenn man das Ruder laufen lässt.

Die Debatte blieb nicht ohne Folgen. Im Jahre 1993 veröffentlichte Rawls sein zweites großes Buch, »Politischer Liberalismus«. Es ist mehr das Ergebnis der Diskussionen um die übermächtige »Theorie der Gerechtigkeit« als ein Werk von eigenem Recht, gewissermaßen die Version 2.0 des Klassikers – jedoch mit einem gewichtigen Unterschied. Rawls vollzieht hier die Wende vom reinen Moralphilosophen zum pragmatisch denkenden Geist.

Der »Schleier des Nichtwissens« motiviert zur Gerechtigkeit

In dem aus Vorlesungen entstandenen Traktat unterzieht Rawls seine alten Konzepte einer kritischen Revision und weicht sie dabei auf. So war immer wieder eingewendet worden, die »Theorie der Gerechtigkeit« sei nur eine sich an das Projekt der Aufklärung anschließende säkulare Heilslehre. Wer deren Voraussetzungen, zum Beispiel den Glauben an autonom handelnde Individuen, nicht akzeptiere, der bleibe außen vor. Moderne Gesellschaften sind aber zu vielfältig, als dass Rawls' Modell jedem ihrer Mitglieder vernünftig erscheinen müsste.

In seinem neuen Werk trägt Rawls diesem Umstand Rechnung, indem er das »Faktum des Pluralismus« in den Mittelpunkt stellt. In modernen demokratischen Gesellschaften kursieren zahlreiche »vernünftige umfassende Lehren«, einschließlich der »nicht-liberalen und religiösen«. Weil sie vernünftig sind, kann keine von ihnen von vornherein abgewiesen werden. Also gilt es, sie unter einen Hut zu bringen. Dieser Befund nötigte Rawls, sein Modell auf höherer Ebene neu zu durchdenken: »Wie kann eine Gesellschaft freier und gleicher Bürger, die durch konträre religiöse, philosophische und moralische Lehren einschneidend voneinander getrennt sind, dauerhaft bestehen?« Jedenfalls nicht durch eine alle anderen überragende Megaweltanschauung; denn die gibt es offensichtlich nicht.

So vermögen Christen und strikte Liberale kaum einen moralischen Konsens zu erzielen, wenn es um die Zulässigkeit der Abtreibung geht. Sie können jedoch eine rechtliche Einigung finden, wenn sie sich der »öffentlichen Vernunft« und damit der höheren, pragmatischen Einsicht stellen, dass es ein dauerhaftes Miteinander nur im Frieden gibt. Die Lösung für Probleme, die Mitgliedern einer Gesellschaft aus verschiedenen Weltbildern erwachsen, liegt also nicht im Grundsätzlichen, sondern im Politischen – und das führt zu dem moralischen Imperativ offenen, liberalen Diskurses. Deswegen wählte Rawls für die Fortschreibung seiner Gerechtigkeitstheorie den Titel »Politischer Liberalismus«.

Der Charakter der übergreifenden Vernunft, an deren Händchen fremde Weltbilder zueinander finden sollen, spiegelt sich in den Gesetzen und der staatlichen Verfassung eines pluralistischen Staates. In ihnen kommt zum Ausdruck, was alle Bürger, trotz weltanschaulicher Differenzen, allgemein anerkennen. Ihre normative Grundlage hat diese Vernunft wiederum in Rawls' Gedankenexperiment. Nur geht es den Unterhändlern nicht direkt um die »Gerechtigkeit« selbst, sondern zunächst um die Frage, was als rationale Grund- ▷

▲ Klammheimlich, in Form einer gemütlichen Kaffeetafel und unter Ausschluss des Volkes, das sie vertreten soll, übernimmt am 28. Juni dieses Jahres die vorläufige Regierung des Irak die zivile Gewalt von den amerikanischen Besatzern – eine Konzession an den allgegenwärtigen Terror und zugleich das Eingeständnis, dass sich diese Regierung ihre Legitimität erst noch erarbeiten muss.

▷ lage des Umgangs der Bürger miteinander gelten soll. Damit verweist Rawls pikanterweise sein bis dahin zentrales Konzept der Gerechtigkeit auf den zweiten Rang. Denn erst nachdem seine fiktiven Unterhändler ihre Staatsverfassung beschlossen haben, können sie sich – auf deren Grundlage – darum streiten, was etwa »gerecht« sein soll.

Auf diese schlaue Weise erweitert, vereint das Rawls'sche Modell nicht mehr nur Freunde, sondern auch einstige Feinde unter seinem Theoriegewölbe. Mit etwas gutem Willen können da auch Kommunitarier ihre Wertegemeinschaften unterbringen – eine Gruppe kann sich schließlich darauf einigen, nach bestimmten Werten zu leben, etwa wie die Amish People in den Vereinigten Staaten, während ihre Nachbarn ganz anderen Idealen folgen. Auch Rawls selbst darf seine ursprüngliche, das Rechte vor das Gute stellende Gerechtigkeitskonzeption nach wie vor für die »vernünftigste« halten, wenngleich er unumwunden eingesteht: »Darüber stimmen, wie es scheint, andere vernünftige Menschen nicht mit mir überein.«

Um zur Völkergemeinschaft zugelassen zu werden, muss ein Staat nicht demokratisch sein – nur »achtbar«

Der »Politische Liberalismus« schloss Rawls' jahrzehntelanges Nachdenken über die normativen Aspekte politischen Handelns im Rechtsstaat weit gehend ab. Doch seinem umfangreichen Theoriegebäude fehlte trotz skrupulöser Argumentation ein Schlussstein. Die Erörterungen drehen sich nur um die Gerechtigkeit innerhalb von Staaten, nicht aber darum, wie man Gerechtigkeit in Zeiten der Globalisierung unter den Völkern definieren mag. In seinem Traktat »Recht der Völker« (2001, auf Deutsch 2002), kurz vor seinem Tod erschienen, reicht er seine Antwort darauf nach.

Statt natürlicher Personen sind es nun ganze Völker, die in einem hypothetischen Gesellschaftsvertrag die Grundsätze ihrer künftigen Beziehungen festlegen sollen. Analog zur »Theorie der Gerechtigkeit« müssten sie sich unter dem »Schleier des Nichtwissens« darauf einigen, die am meisten benachteiligten Mitglieder der internationalen Völkergemeinschaft zu stärken. Doch unter den aufgeweichten Prinzipien des »Politischen Liberalismus« geht es wiederum mehr um die Verfahrensregeln des Miteinander, die eine Debatte über »Gerechtigkeit« überhaupt erst erlauben. Wenig überraschend leitet Rawls her, dass ein solches Vertragswerk den einzelnen Staaten Dinge wie politische Unabhängigkeit, Selbstachtung, den Schutz der politischen Kultur oder die territoriale Integrität zugestehen muss.

Doch in den Genuss solchen Rechtsschutzes soll nicht jeder Staat kommen. Ebenso wie beim »Faktum des Pluralismus« lässt sich der Philosoph von der Realität belehren, diesmal darüber, dass es nicht nur »gute« Demokratien, sondern auch menschenverachtende Diktaturen gibt. Wer über dieses Detail hinwegsieht, sanktioniert die Ungerechtigkeit in jenen Ländern – und potenziell weltweit. Denn »die großen Übel in der menschlichen Geschichte«, wie ungerechte Kriege und Unterdrückung, Völker- und Massenmord, seien »Folgen politischer Ungerechtigkeit«. Vor dem Schiedsgericht der Vernunft sind also die Staaten, anders als die Einzelmenschen, keineswegs gleich. Expansionistische »Schurkenstaaten« und wohlwollende, doch ungerechte Regime bleiben deshalb von seinem Vertragswerk ausgeschlossen.

Ein Irak unter Saddam Hussein musste nach Rawls' Vorgaben draußen bleiben; Demokratien dagegen haben natürlich Zutritt zur Gemeinschaft gleichberechtigter Mitglieder. Doch auch Rawls dachte daran, Völker, die auf Grund »ungünstiger Bedingungen« noch kein gerechtes Institutionensystem ausbilden konnten, ebenfalls einzulassen – das trifft auf den Irak natürlich zu. Aber das nützt in der gegenwärtigen Situation nicht viel – im Irak ist ja gerade umstritten, wer für dieses Land die Stimme führen darf.

Außerdem will Rawls jene Länder zulassen, die keine demokratische Verfassung haben, aber dennoch »achtbar« sind, weil sie die Menschenrechte einhalten, Rechtssicherheit gewährleisten und keine Angriffskriege führen, selbst wenn es kein umfassendes Mitbestimmungsrecht oder keine Religionsfreiheit geben mag. Die Zulassung dieser Länder hat Rawls heftige Kritik eingetragen. Denn letztlich stellt er sie mit Demokratien auf eine Stufe, und es ist nicht ganz ersichtlich, was jene undemokratischen, aber liberalen Staaten vor restriktiveren Ländern auszeichnen soll. Pragmatisch gesehen mag die Entscheidung verständlich sein. Doch indem die Verfassung unfreier Gesellschaften als »achtbar« und damit vernünftig gilt, erhalten sie durch die Hintertür moralphilosophische Weihen.

Wenn also der Irak sich eine Verfassung geben würde, die den Koran zur Grundlage jeden Rechts erhebt, undemokratisch ist und Minderheiten nicht zum Zuge kommen lässt, so hätte Rawls aus seiner philosophischen Position nichts dagegen einzuwenden. Das bleibt unbefriedigend – zumindest für jene sturen Köpfe, die unverzagt am Ideal liberaler Demokratie festhalten. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Hubertus Breuer ist promovierter Philosoph und arbeitet als Wissenschaftsjournalist in New York.

Eine Theorie der Gerechtigkeit. Von John Rawls. Suhrkamp, Frankfurt am Main 2003

Politischer Liberalismus. Von John Rawls. Suhrkamp, Frankfurt am Main 2003

Gerechtigkeit als Fairneß. Von John Rawls. Suhrkamp, Frankfurt am Main 2003

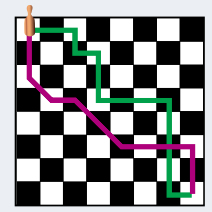
Das Recht der Völker. Von John Rawls. De Gruyter, Berlin 2002

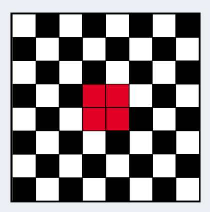
Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

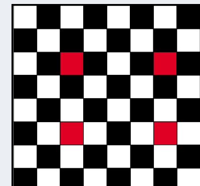
PREISRÄTSEL

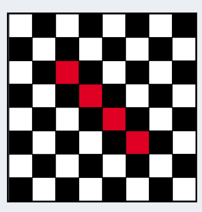
Spaziergang auf einem Schachbrett

Von Pierre Tougne









Ein Spielstein steht in der linken oberen Ecke eines Schachbretts. Er kann entweder nach rechts oder nach unten gehen. Sein Ziel ist die rechte untere Ecke (ein möglicher Weg ist auf dem ersten Brett grün eingezeichnet).

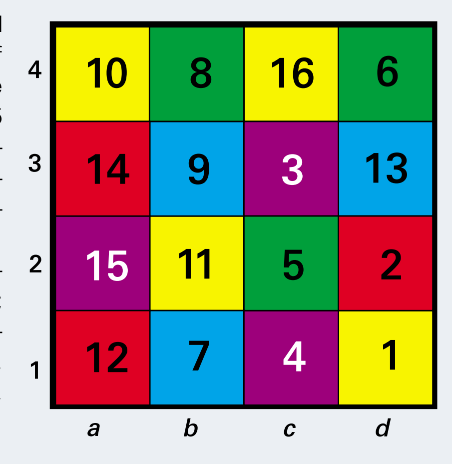
Wie viele verschiedene Wege kann er gehen, um sein Ziel zu erreichen? Wie viele Wege kann er auf jedem der drei anderen Bretter gehen, deren rote Felder er nicht betreten darf?

Wie viele Wege sind in jedem der vier Fälle möglich, wenn der Spielstein nun außerdem diagonal nach unten rechts ziehen kann (ein Weg ist violett eingezeichnet)?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg. Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir einen Experimentierkasten »Kosmos Electro E 2000«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 17. August 2004, eingehen.

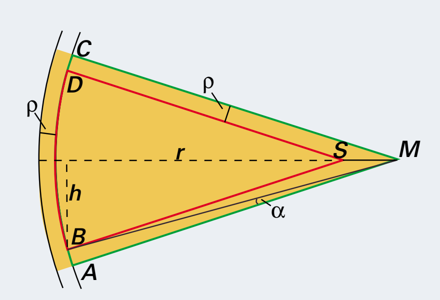
Lösung zu »Buntes Durcheinander« (Mai 2004)

Dies ist der einzig mögliche Endzustand des Puzzles (Bild rechts). Die Zahlen auf den Farbplättchen geben eine mögliche Auslege-Reihenfolge an. Es gibt 14925 verschiedene Reihenfolgen, wie Michael Goetze aus Esslingen durch erschöpfende Suche mit Hilfe eines Computerprogramms herausfand.



Die Gewinner der fünf Kreisel »Gyrotwister« sind Christine Kiss, Tönisvorst; Heidemarie Lampe, Greifswald; Werner Hanke, Erlangen; Johann Meier, Unterschleißheim; und Arnfried Mack, Karlsruhe.

Lösung zu »Der Nusskuchen« (Juni 2004)



Die Wahrscheinlichkeit, die Nuss anzuschneiden, beträgt bei einem Kuchen mit 20 cm Durchmesser etwa 30,78 Prozent. Um diese Wahrscheinlichkeit auf 10 Prozent zu drücken, müsste man den Kuchen auf einen Durchmesser von etwa 63,08 cm vergrößern.

Bernd Rümmler aus Göttingen betrachtete nur eines der 10 Kuchenstücke (hellbraun in der Skizze links). Da die Nuss nicht aus dem Kuchen herausragen kann, muss ihr Mittelpunkt in dem grün berandeten Kreissektor *AMC* liegen. Der Abstand des Kreisbogens *AC* zum äußeren Kuchenrand ist gleich dem Radius ρ der Nuss. Die Fläche, in welcher der Mittelpunkt der Nuss liegen muss, um nicht angeschnitten zu werden, ist rot umrandet. Sie hat von den beiden Schnittlinien $\overline{AM}$ und $\overline{MC}$ wieder den Abstand ρ. Manche Leser nahmen an, es handle sich um einen Kreissektor. Dies ist nicht der Fall.

Die Wahrscheinlichkeit, mit welcher die Nuss angeschnitten wird, ist nun gleich dem Verhältnis von grünem Kreisausschnitt zu dem Bereich, der außerhalb der roten Fläche liegt. Aber wie groß ist diese Fläche?

Die Hälfte davon ist *AMSB*. Sie setzt sich aus zwei Teilen zusammen, nämlich dem Dreieck *MSB* mit der Höhe *h* und Grundseite $\overline{MS}$ sowie dem Kreissektor *MBA* mit dem Winkel α.

α und *h* ergeben sich aus trigonometrischen Überlegungen. Die Grundseite $\overline{MS}$ ist der Radius eines regelmäßigen Zehnecks mit der Kantenlänge 2ρ. Damit sind alle benötigten Größen bekannt, und das Verhältnis der Flächen ergibt sich zu 0,3078.

Indem man in der entstandenen Gleichung das Flächenverhältnis mit 0,1 vorgibt und stattdessen den Kuchenradius *r* als Unbekannte nimmt, erhält man eine neue Gleichung, die iterativ zu lösen ist. Das Ergenis ist $r = 63,08$ cm.

Die Gewinner der drei Strategiespiele »Blokus« sind Wolfgang Meier, Bochum; Jürgen Baumann, Köln; und Hans Böckl, München.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

REPORT

SPORTWISSENSCHAFT

Forschen für Rekorde

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Medaillen sind nicht nur für Sportler Lohn der Mühe, sondern auch für die Wissenschaftler, die das Training optimieren und Hightech-Sportgeräte entwickeln.

TRAINING I

Der vermessene Athlet

Raffinierte Sensorsysteme und computergestützte Videoauswertung helfen, Bewegungsabläufe und Krafteinsatz zu optimieren.

Von Frank Frick

Wenn Tim Lobinger, im vergangenen Jahr Hallenweltmeister im Stabhochsprung, zu seinem ersten Versuch anläuft, hat Falk Schade einen wichtigen Teil seiner Arbeit schon hinter sich: Mit Hilfe eines sechs Meter langen Gitterkäfigs hat der Leiter für biomechanische Leistungsdiagnostik des Olympiastützpunkts Köln-Bonn-Leverkusen fünf Videokameras eingerichtet, die den Absprungbereich im Visier haben. Die Überlagerung der Videomitschnitte des Sprungs mit diesen Kalibrationsaufnahmen ermöglicht dann die genaue Angabe der räumlichen Position ausgewählter Punkte wie etwa der Ferse Lobingers.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Mit seinem Messkäfig ist Schade regelmäßig zu Gast bei deutschen Meisterschaften, sogar das Stabhochsprung-Finale bei den Olympischen Spielen in Sydney hat er analysiert. Nach dem Wettkampf errechnet der Wissenschaftler im Institut für Biomechanik der Deutschen Sporthochschule Köln mit einer Software Länge und Geschwindigkeit der letzten Anlaufschritte, die stärkste Durchbiegung des Stabs, die maximale Höhe des Körperschwerpunkts sowie die Energie des Athleten beim Einstich des Stabs und beim Überqueren der Latte. Für seine Auswertung liest Schade nicht alle Bilder eines Sprungs in den Computer ein, sondern wählt einige in entscheidenden Phasen aus. Darin markiert er wichtige Körperteile des Athleten, zum Beispiel Fußspitzen, Kniegelenke, Ellenbogen und Kopf, und lässt den Computer deren Bewegungsbahn errechnen. Mindestens 20 Sprünge pro Woche kann der Forscher so analysieren.

◀ Auch Tim Lobinger, Hallenweltmeister im Stabhochsprung 2003, setzt beim Training auf die Wissenschaft.

Die Informationen übermittelt er per E-Mail an Sportler und Trainer – angereichert mit einer Art Strichmännchendarstellung des Bewegungsablaufs. »Daraus lässt sich beispielsweise auf einen Blick erkennen, wie sich die Griffhände beim Einstich des Stabs bewegt haben – was wiederum etwas darüber sagt, welche Biegearbeit der Athlet am Stab verrichtet hat«, erläutert Schade. Die muss auf die physischen Voraussetzungen des Springers und die Härte des Stabs abgestimmt sein.

Diagnostik des Absprungs

Einmal pro Saison bespricht er seine Analysen mit den Athleten des Nationalkaders, ihren Trainern und dem Teamleiter Stabhochsprung des Deutschen Leichtathletik-Verbands. Natürlich könne er dem Sportler etwa empfehlen, die Schritte des Anlaufs auf eine bestimmte Weise zu verändern, so Schade. Allerdings: »Oft ist der Bewegungsablauf Ausdruck körperlicher Gegebenheiten und der Sportler muss erst einmal an seinen Sprungfähigkeiten arbeiten, um die Technik umstellen zu können.«

Schade und die Kölner Biomechaniker arbeiten bereits an der nächsten Entwicklungsstufe ihres Diagnosesystems: Dabei beziehen sie auch die Zu- und Abnahme der Energie im Stab in ihre Analysen ein, indem sie die Kräfte im Einstichkasten messen. »Patentrezepte nach dem Motto ›Verbessere diesen Wert, dann wirst du au-

tomatisch höher springen‹ wird es jedoch nie geben«, ist der Forscher überzeugt. Notwendige Umstellungen der komplizierten Abläufe beim Stabhochsprung liegen eher im Detail.

Offensichtlicher sind die Auswirkungen vergleichbarer Messungen bei Spitzenruderern. Ausgetüftelt vom Institut für Forschung und Entwicklung von Sportgeräten (FES) in Berlin (siehe den Beitrag S. 98) erfasst eine mobile Elektronik im Bug und an jedem Ruderplatz mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen acht verschiedene Parameter, beispielsweise die Kräfte an den Dollen oder an den Stemmbrettern. Die Grafiken der Kraftverläufe können am PC im Begleitboot mit Videobildern synchronisiert werden. So sieht der Trainer sofort, ob die Mannschaft harmoniert. »Notfalls wird ein Ruderer ausgetauscht«, erläutert Harald Schaale, Direktor des FES.

In den Stützpunkten des Deutschen Ruderverbands wird dieses System auch benutzt, um die individuelle Technik zu perfektionieren. Bildschirme im Boot geben jedem Athleten ein direktes Feed-back: Ein Blick und er erkennt, wie sich die relevanten Daten während seiner letzten Ruderschläge verändert haben. Mitglieder des A-Kaders trainieren seit Jahren mit dem System. »Die schauen auf die Messkurven und wissen sofort, was sie ändern müssen«, konstatiert Peter Teller, der das Messsystem am FES entwickelt hat.

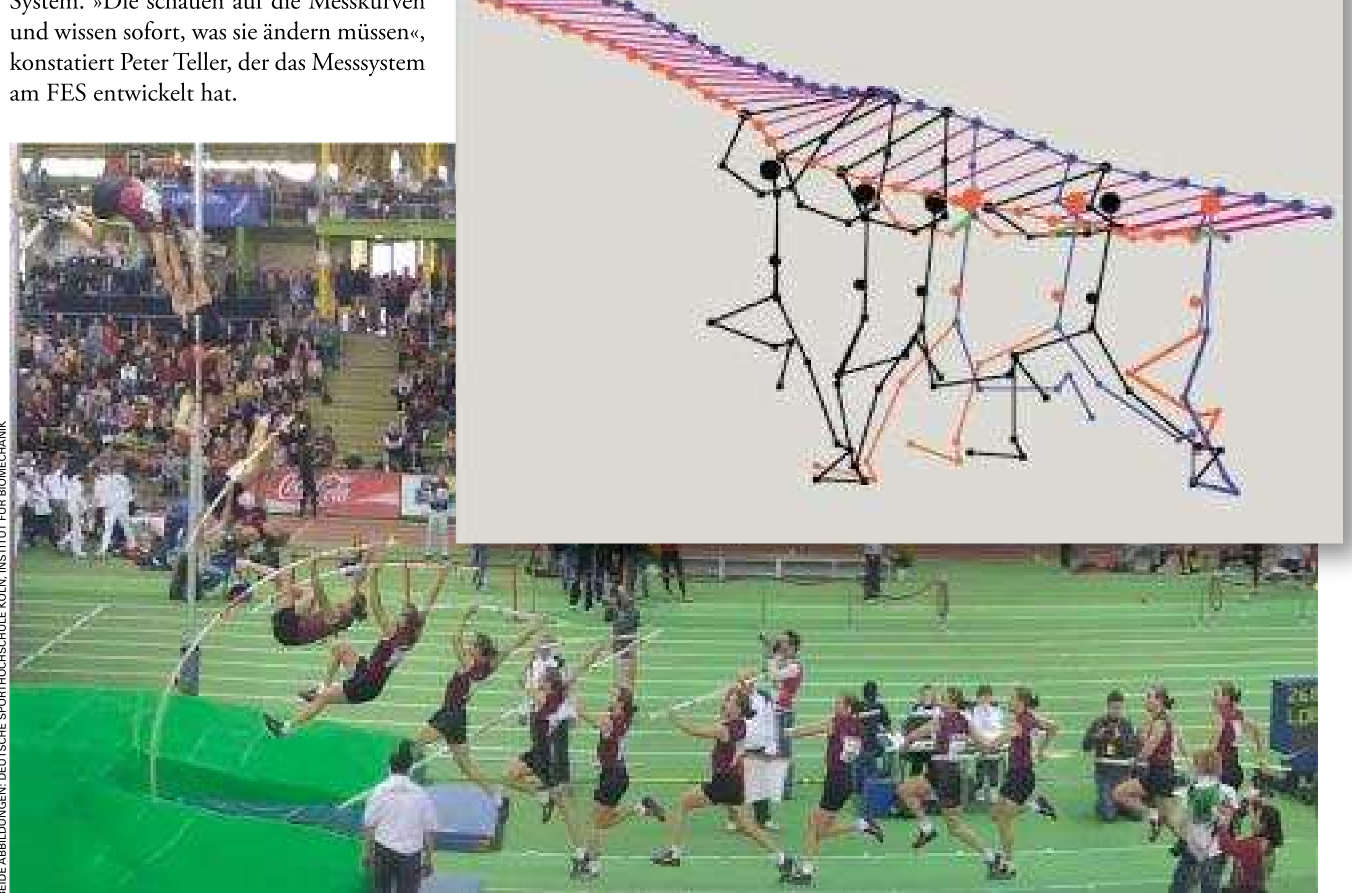
Bis 1990, damals noch als DDR-Einrichtung, betrieb das FES eine eigene Flotte von Messbooten. »Der technische Unterschied zwischen denen und den Rennexemplaren wurde zu groß, der Unterhalt der Flotte zu teuer«, begründet Schaale, warum das FES schon vergleichsweise früh auf Sensorsysteme setzte, die in das normale Sportgerät integriert werden können.

Speerwurftraining mit dem Beschleunigungssensor

Andere Sportarten hinken da hinterher: Wenn die Abwurfgeschwindigkeit eines Speerwerfers gemessen werden sollte, musste dieser bis zum letzten Jahr einen speziellen Speer in die Luft schleudern, der über Drähte mit einer Auswertungselektronik am Körper verbunden war. »Diese Verkabelung störte den Bewegungsablauf sehr«, sagt Maria Ritschel, Speerwurf-Bundestrainerin für Frauen. Hinzu kam, dass die Messspeere deutlich schwerer waren als normale Geräte und auch einen anderen Schwerpunkt hatten.

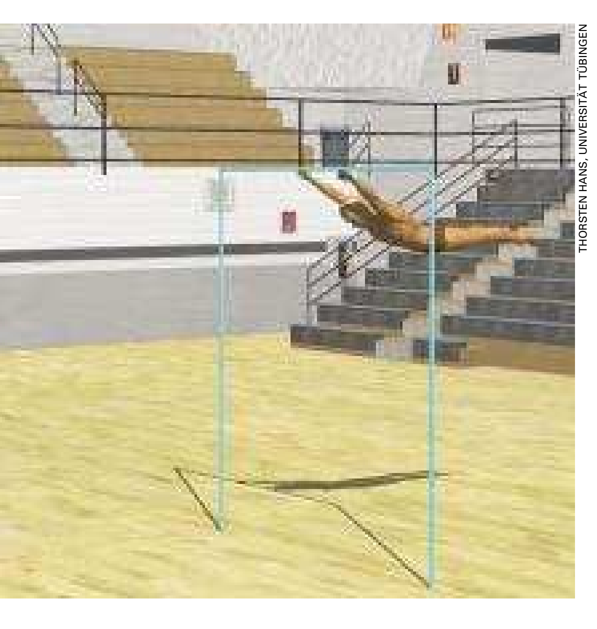
Inzwischen gibt es Abhilfe: Ingenieure vom Magdeburger Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF) entwickelten einen »digitalen Wurfspeer«, in den eine 75 Gramm leichte Bordelektronik eingebaut ist. Sensoren messen während der Werfer anläuft und beim Abwurf des Speers nicht weniger als 500-mal pro Sekunde die Beschleunigung. Ein Computerchip speichert die Daten. Über einen Magnetadapter kann die Information direkt nach dem Wurf auf einen Laptop überspielt werden. Trainerin Ritschel überprüft mit dem IFF-Speer im Wurfzentrum des Olympiastützpunkts Magdeburg/Halle regelmäßig den Leistungsstand der Sportlerinnen. Der grafischen Darstellung der Messwerte entnimmt sie, wie gut der Abwurf war: »Ideal ist ein extrem steiler, fast nadelförmiger Beschleunigungsverlauf«, so Ritschel. ▷

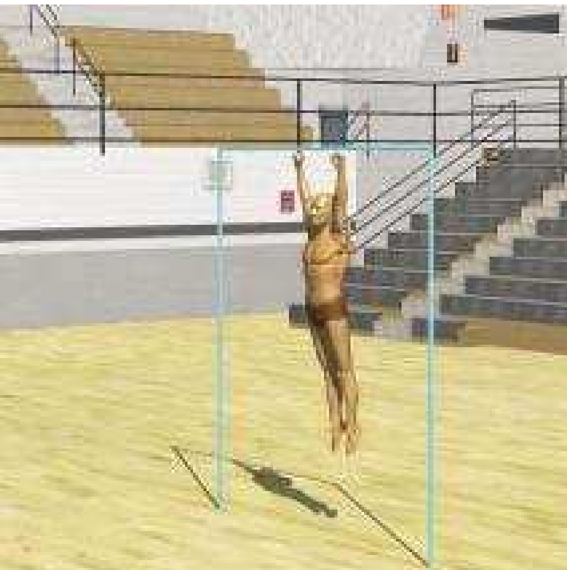
▼ Wie wird Tim Lobinger bei der Olympiade abschneiden? Videoanalysen am Institut für Biomechanik der Deutschen Sporthochschule Köln helfen, seine Technik zu verfeinern.

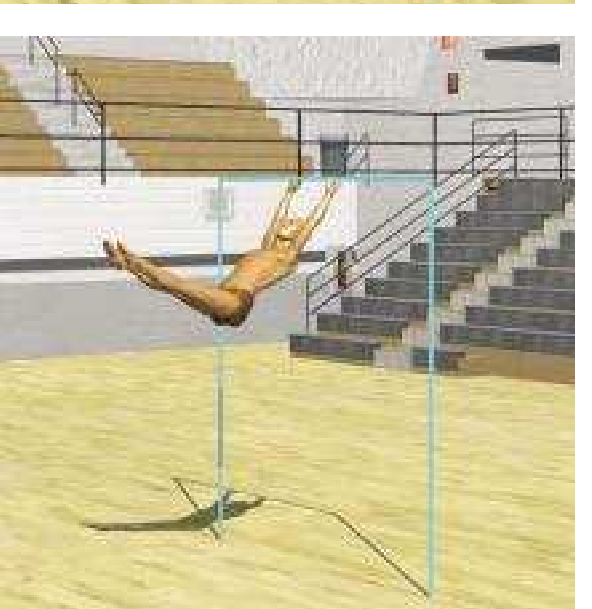


BEIDE ABBILDUNGEN: DEUTSCHE SPORTHOCHSCHULE KÖLN, INSTITUT FÜR BIOMECHANIK

▼ **Welche Muskelkräfte sowie Drehmomente ein Reckturner aufbringt, simuliert eine an der Universität Tübingen entwickelte spezielle Software in Echtzeit.**







THORSTEN HANS, UNIVERSITÄT TÜBINGEN

▷ Auch in der Heidelberger Schwimmhalle des Olympiastützpunkts Rhein-Neckar ist ein sensorbestücktes Gerät im Routineeinsatz, mit dem sich die Bewegungen der Sportler unter besonders wettkampfnahen Bedingungen analysieren lassen. Bisher hingen die Schwimmer bei der Technikanalyse an Zugseilen, die aber bremsen und mit denen man den Geschwindigkeitsverlauf jeweils nur für wenige Schwimmzyklen messen kann. Oder ein Sportler musste ortsfest in einem Schwimmkanal trainieren – eine Situation, die vor allem anders auf die Psyche wirkt als in einem normalen Becken.

Typische Schwimmfehler zeigt der Monitor

Der walkmangroße »DigiCoach«, entstanden aus einer Kooperation der EML Research GmbH mit dem Institut für Sport und Sportwissenschaften der Universität Heidelberg, wird mit einem Gurt über der Lendenwirbelsäule des Schwimmers befestigt. Wie der digitale Speer arbeitet der digitale Schwimmbegleiter während der Aktivitäten des Athleten autonom und speichert Beschleunigungswerte. Zusätzlich nehmen zwei Unterwasserkameras die Bewegungen der Juniorenschwimmer auf, deren Technik im Olympiastützpunkt in Heidelberg regelmäßig überprüft wird. Nachdem der Sportler aus dem Wasser gestiegen ist, werden die Daten auf einen Computer übertragen. Zur Analyse können später Bildinformationen und Messkurven simultan wiedergegeben werden. »Typische Fehler wie zu starkes Anhocken der Beine in der Rückholphase des Brustschwimmens oder das Einbrechen des hohen Ellenbogens sind so leicht erkennbar«, sagt EML-Wissenschaftler Markus Buchner, der den digitalen Schwimmbegleiter wesentlich mitentwickelt und den einzigartigen Messplatz Anfang 2003 aufgebaut hat.

Auch die virtuelle Realität hat den Leistungssport erreicht. Der Astrophysiker und Biomechaniker Hanns Ruder von der Uni Tübingen und sein Doktorand Thorsten Hans haben einen Simulator für das Reckturnen entwickelt. Der Athlet kann vor dem Bildschirm an einem 17-gliedrigen Homunkulus Bewegungsabläufe testen, bevor er sie an der Stange ausführt. Für den Koblenzer Leistungsturner Sebastian Quirbach haben sich die Trockenübungen ausgezahlt: Am Joystick überwand er seine Probleme mit dem komplizierten Kovacs-Salto. ◁

Frank Frick ist promovierter Chemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Bornheim bei Bonn.

FES



Dehnungsmessstreifen ermitteln beim Rudereinsatz bis zu acht Parameter. Auf den Bildschirmen erkennt jeder Athlet sofort, ob er gerade gut ins Team passt.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Schuss ins Schwarze: Sportarten mit einem hohen Aufwand an kognitiver Leistung eignen sich besonders gut, um die Ausführung mental zu üben.

TRAINING II

Fleiß ohne Schweiß

Gedankliches Durchspielen der Bewegungsabläufe kann im Hochleistungssport über Sieg und Niederlage entscheiden.

Von Thomas Schack

Mit hochkonzentriertem Gesichtsausdruck, doch scheinbar in Gedanken versunken bereitet sich eine Sportlerin auf den nächsten Versuch im Hochsprung vor. Das merkwürdige Verhalten vieler Athleten ist Teil eines systematischen Trainings, das seit mehreren Jahrzehnten im Hochleistungssport eingesetzt wird. Es basiert auf Vorstellungen der Bewegungsabläufe ohne tatsächliche körperliche Aktivität.

Dabei kann sich ein Hochspringer den »Fosburyflop« aus der Innenperspektive vorstellen oder aus der Warte eines Zuschauers. Dieses mentale Training wird seit den 1960er Jahren genutzt, damals noch unter Geheimhaltung. Wissenschaftliche Untersuchungen interessierten anfangs nicht, es zählte allein der Erfolg bei der Stabilisierung und Optimierung sportlicher Leistungen während des Wettkampfs. So waren es zunächst Einzelergebnisse und anekdotische Erzählungen, die dem mentalen Training zum Durchbruch verhalfen.

Systematische Studien gibt es erst seit den 1980er Jahren, sowohl aus osteuropäischen als auch aus westlichen Ländern. Schnell wurde deutlich, dass mentales Training das aktive Üben zwar nicht ersetzen kann, aber dennoch die sportliche Leistung verbessert. Wie diese beiden Trainingsformen – mit und ohne Bewegung – optimal zu kombinieren sind, ist abhängig von der Sportart. Je höher die Anforderungen an die kognitiven Fähigkeiten, wie etwa beim Turnen oder Sportschießen, desto mehr profitiert der Sportler von der geistigen Einübung der Abläufe. Bei Sportarten, die vor allem energetische Anforderungen stellen wie der Ausdauerlauf, sind die Effekte weit geringer.

Doch warum erzielt die mentale Simulation überhaupt eine Wirkung? Bereits 1852 hatte der britische Forscher William B. Carpenter angenommen, reflexhafte Bewegungen können durch Vorstellungen ausgelöst werden. Solche »ideomotorischen Reflexe« entstünden, weil Vorstellungen und Bewegungen eine feste Verbindung eingehen. 1932 zeigte Edmond Jacobson, dass das gedankliche Durchspielen von Bewegungen tatsächlich auch von einer elektrischen Aktivierung der benötigten Muskelgruppen begleitet wird. Der Effekt von mentalem Training würde demnach auf deren wiederholter Ansteuerung beruhen. Aktuellere Studien zeigten allerdings: Diese Aktivierung ist eher Folge, nicht Ursache von Lerneffekten der geistigen Simulation.

Das Gehirn aktivieren

Offenbar sind Bewegungen im Gedächtnis gespeichert, Vorstellung und Ausführung laufen auf der Basis derselben Gedächtnisstrukturen ab. Nicht nur die motorische Aktivität optimiert also diese Erinnerungseinträge, sondern auch die mentale Simulation einer Bewegung. Insbesondere die Forschungsgruppe um den französischen Neurophysiologen Marc Jeannerod konnte ▷



DEUTSCHE SPORTHOCHSCHULE KÖLN, INSTITUT FÜR PSYCHOLOGIE

Wie die Vorstellung von Bewegung während des mentalen Trainings mit Gehirnaktivitäten einhergeht, messen Wissenschaftler im Testlabor der Sporthochschule Köln.

▷ in den letzten Jahren zeigen, dass beim mentalen wie beim aktiven Training jeweils dieselben Hirnareale beteiligt sind.

Dieser Nachweis erfolgt aber meist an wenig komplexen Bewegungen etwa der Finger. Um zu klären, welche Hirnbereiche bei der Vorstellung körperlicher Abläufe beim Sport aktiviert werden, haben wir in den letzten Jahren ein neurowissenschaftliches Zentrum an der Deutschen Sporthochschule Köln eingerichtet. Die von mir geleitete Arbeitsgruppe »Neurokognitive Architektur von Bewegungen« und die Arbeitsgruppe »Sport und Gehirn« von Wildor Hollmann versuchen eine Bewegungsneurowissenschaft zu etablieren. Dabei geht es im Zusammenhang mit mentalem Training um neurophysiologische und kognitive Strukturen, die sowohl für Bewegungsausführung als auch -vorstellung von Bedeutung sind. Dazu entwickelten wir computergestützte experimentelle Verfahren, um bewegungsbezogene Gedächtnisstrukturen in relativ kurzer Zeit – 10 bis 15 Minuten – zu erfassen. Dabei messen wir unter anderem die Gehirnaktivität während des mentalen Trainings.

Knoten im Kopf

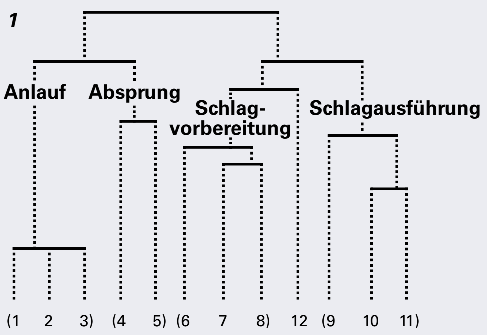
Eine aktuelle Untersuchung beschäftigt sich mit dem Angriffsschlag im Leistungsvolleyball. Dort sind mindestens zwölf Zwischenschritte wichtig. Die »Knotenpunkte« 1 bis 3 in Verbindung mit 4 und 5 bilden die Phase »Anlauf und Absprung«. Die »Schlagvorbereitung« besteht aus den Knoten 6, 7 und 8, schließlich ergeben 9, 10, 11 und 12 die »Schlagausführung«. Wie diese Zwischenschritte im Gedächtnis hinterlegt sind, haben wir bei der Juniorinnen-Nationalmannschaft im Volleyball im Vorfeld untersucht. So zeigte zum Beispiel eine der Außenangreiferinnen eine klar strukturierte und nahezu idealtypische Bewegungsrepräsentation des Angriffsschlags im Gedächtnis. Bei einer anderen hingegen, die seit mehreren Jahren Schwierigkeiten mit der optimalen Ausführung hatte, ergab die Analyse eine weniger ausgeprägte Gedächtnisstruktur für die Impulsfolge bei Anlauf und Absprung.

Ein individualisiertes mentales Training setzte deshalb dort an. Dabei achteten wir in einem ersten Schritt darauf, dass die Spielerin bei der realen Ausführung die veränderte Bewegung spürte, also ein neues Gefühl dafür entwickelt. Dieses sollte dann beim mentalen Training nachempfunden werden. So konnte die Spielerin ihren Angriffschlag deutlich verbessern: Sie spielt jetzt in der A-Nationalmannschaft der Frauen.

Inzwischen wird mentales Training nicht nur im Leistungs-, sondern auch im Breitensport und darüber hinaus in der Rehabilitation eingesetzt. Bei Sportverletzungen bietet es die Chance, auch dann zu trainieren, wenn die aktive Ausführung einer Bewegung noch stark eingeschränkt ist. Nach Gelenkoperationen oder Gelenkersatz hilft das geistige Üben beim Wiedererlernen alter Bewegungsmuster. Auch in der neurologischen Rehabilitation von Schlaganfallpatienten lässt sich mentales Training wirkungsvoll einsetzen. Hier können beispielsweise Greifbewegungen stabilisiert und schrittweise verbessert werden. ◁

Thomas Schack ist Hochschuldozent am Psychologischen Institut der Deutschen Sporthochschule Köln und lehrt derzeit Sportmotorik und Sportbiomechanik an der Universität Halle-Wittenberg.





Anlauf: 1. Zurückführen der Arme, 2. Stemmschritt 3. Beugung Knie+Rumpf
Absprung: 4. Doppelarmschwung, 5. Beinstreckung
Schlagvorbereitung: 6. Bogenspannung, 7. Schlagarm zurück, 8. hoher Ellenbogen
Schlagausführung: 9. Blick auf den Block, 10. Schlag aus Handgelenk, 11. peitschenartige Streckung des Armes, 12. Schlagarm durchschwingen

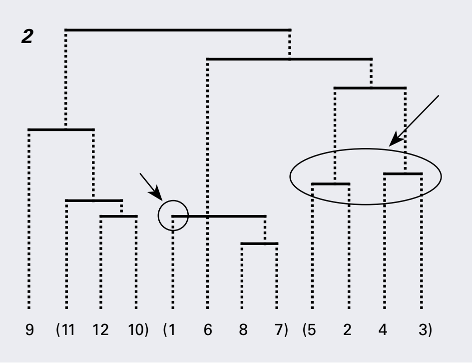


FOTO- UND GRAFIKVORLAGEN: DEUTSCHE SPORTHOCHSCHULE KÖLN, INSTITUT FÜR PSYCHOLOGIE

Die Gedächtnisstrukturen der Bewegungsabfolge beim Volleyball-Angriffsschlag (Foto) sollten nach dem in Grafik 1 dargestellten Muster mit zwölf »Knotenpunkten« organisiert sein. Grafik 2 zeigt eine abweichende Anordnung – das erklärt die Probleme der betreffenden Spielerin mit dieser Technik. Mentales Training half bei der »Umschulung«.



Muskeln nach Maß

Die körperliche Leistungsfähigkeit des Menschen wird zum Teil von seinen Genen bestimmt. Wird es irgendwann möglich sein, Supersportler zu züchten?

Von Stefanie Reinberger

Sie haben klangvolle Namen wie Margaret Okoya, Hicham El Guerrouj oder Haile Gebreselassie. Sie kommen aus Kenia, Marokko und Äthiopien und dominieren die Lang- und Mittelstreckenrennen der Welt. Und auch der Deutsche Dieter Baumann bekam nach seinem olympischen Sieg über 5000 Meter in Barcelona den Beinamen »der weiße Kenianer«. Fast scheint es, als ob das ausdauernde Laufen eine natürliche Gabe der Frauen und Männer des Schwarzen Kontinents sei. Haben sie vielleicht ein spezielles Lauf-Gen?

»Es ist durchaus denkbar, dass die Leistung der Kenianer eine genetische Grundlage hat«, glaubt Bernd Wolfarth vom Klinikum rechts der Isar in München. Zwillingsstudien in den 1970er und 1980er Jahren hätten gezeigt, dass die Ausdauerleistungsfähigkeit in hohem Maße genetisch festgelegt ist. Doch an ein einzelnes Lauf-Gen glaubt Wolfarth nicht.

Der Sportmediziner beschäftigt sich seit langem mit den molekularbiologischen Grundlagen körperlicher Leitungsfähigkeit. Gemeinsam mit einer internationalen Gruppe von Wissenschaftlern gibt er jedes Jahr die »Fitmap« heraus, eine Art Landkarte für Genvarianten, fachlich Polymorphismen genannt, die im Zusammenhang mit der Fitness stehen. Diese natürlich vorkommenden Variationen umfassen oft nur wenige Bausteine der Erbsubstanz (DNA), doch die können entscheidend dafür sein, ob ein Körper den zur Verfügung stehenden Sauerstoff besser oder schlechter umsetzt.

Über 70 Einträge kreuz und quer über das menschliche Genom hinweg verzeichnet die Fitmap mittlerweile. Wann immer ein Forscherteam einen Polymorphismus identifiziert, der im Zusammenhang mit körperlicher Leistungsfähigkeit zu stehen scheint, wird er aufgenommen. Ein spezielles Gen für Kraft, Ausdauer oder Schnelligkeit hat aber noch niemand gesichtet. »In den letzten fünf Jahren wurde viel veröffentlicht, aber nur wenig bestätigt«, gibt Wolfarth überdies zu bedenken.

Gene für mehr Sauerstoff

Interessante Anwärter gibt es allerdings. So nahm ein Forscherteam um Hugh Montgomery vom University College London das Agenosin-Konvertierungsenzym, nach dem englischen Namen kurz ACE genannt, unter die Lupe. Das ist an der Regulation des Blutdrucks beteiligt und seine Erbinformation tritt in zwei Versionen auf: als normal langes Gen und als verkürztes ACE-D, dem 287 DNA-Basenpaare fehlen. Montgomery verglich 1998 normal sportliche Menschen mit Bergsteigern, die Höhen über 7000 Meter ohne Sauerstoffgerät bewältigten. Dabei stellte er fest, dass die ACE-D-Variante in der Extremsportlergruppe deutlich häufiger vorkam. Eine Studie mit russischen Athleten wies in die gleiche Richtung: Bei Ausdauersportlern wie Triathleten war die verkürzte Variante deutlich häufiger verbreitet als bei Sprintern. Menschen, die im normalen Leistungsbereich sporteln, zeigten übrigens keinen solchen Unterschied.

Montgomerys Ergebnisse schienen zunächst eindeutig, doch werden sie mittlerweile in Frage gestellt, denn neuere Untersuchungen können sie nicht bestätigen. So verglich Wolfarth gemeinsam mit dem derzeit in Amerika tätigen Wissenschaftler Claude Bouchard in seiner »Genathleten-Studie« Ausdauersportler mit Normalpersonen: Bei den insgesamt 585 Probanden zeichnete sich keinerlei Tendenz in der Verteilung der ACE-Varianten ab.

Ein weiterer Kandidat, der Anlass zu Spekulationen gibt, ist das Gen für den Erythropoetin-Rezeptor, kurz EPOR genannt. Erythropoetin (EPO) ist den meisten Sportinteressierten aus Dopingskandalen im Radsport bekannt. Der Wachstumsfaktor regt die Vermehrung der Sauerstoff transportierenden roten Blutkörperchen an (allerdings mit dem Risiko für Ausdauersportler, dass bei gleichzeitig hohem Wasserverbrauch das Blut zu stark eindickt und Gefäße verstopfen). Dass auch der zugehörige Rezeptor eine wichtige Rolle spielt, entdeckten die finnische Ärztin Eeva Juvonen und ihr Team von der Universität Helsinki. Anfang der 1990er Jahre untersuchte sie eine Familie mit einer erblichen Erythrozytose, einer starken Vermehrung der roten Blutkörperchen. Ursache war eine Mutation im EPOR-Gen. Die Betroffenen zeigten keine Krankheitssymptome und hatten eine normale Lebenserwartung. Auffällig war aber, dass ein Familienange- ▷

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Auf Lang- und Mittelstrecken haben afrikanische Läufer die Nase vorn. Möglicherweise trägt ihre genetische Ausstattung zum Erfolg bei.

Langjährige Kreuzung führte zur Bodybuilder-Erscheinung der Belgischen Blau-weißen Rinder – Ergebnis eines funktionslosen Myostatin-Gens.

höriger trotz oder gerade wegen dieser Veränderung mehrere Weltmeistertitel und einen Olympiasieg im Skilanglauf erringen konnte. Tatsächlich sind mittlerweile mehrere EPOR-Genvarianten bekannt, die im Zusammenhang mit erhöhter Sauerstoffaufnahme und dadurch mit besserer Ausdauer stehen könnten.

»Doch das sind alles nur Hinweise auf mögliche Mitspieler im Gesamtgeschehen«, erklärt Wolfarth. »Die menschliche Genetik ist so kompliziert, dass wir sicher nicht von einem Gen ausgehen können, das alleine die sportlichen Fähigkeiten eines Menschen bestimmt.« Sollte es also gelingen, »Markergene« zu finden, die eine Aussage über Leistungsfähigkeit erlauben, so kommt ihnen wahrscheinlich nur eine bescheidene Rolle im komplexen Zusammenspiel von hemmenden und stimulierenden Faktoren zu.

Eine Auswahl von Nachwuchssportlern mit Hilfe eines Genscreenings, also einer systematischen Durchmusterung der Erbsubstanz, hält der Sportmediziner daher in naher Zukunft für wenig wahrscheinlich. Selbst wenn irgendwann bewiesen werden sollte, dass eine bestimmte Genvariante im Zusammenhang mit Kraft oder Ausdauer steht, heißt ihr Vorkommen noch lange nicht, dass die zugeordnete Eigenschaft tatsächlich auch ausgeprägt wird. Denn ob ein Kind zum Leistungssportler wird, entscheiden vor allem sein soziales Umfeld und seine persönliche Entwicklung. Und auch Montgomery ist sich sicher: »Wenn Sie mir 100 000 britische Pfund gäben, um eine Fußballmannschaft aufzustellen, wäre ich gut beraten, Jugendvereine für die Auswahl von talentiertem Nachwuchs zu bezahlen, anstatt das Geld für genetische Tests auszugeben.«

Mäuse, Menschen, Muskelbullen

Für Diskussionen hat indes etwas ganz anderes gesorgt: die Vision vom genmanipulierten Supersportler. Forscher um Se-Jin Lee von der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore haben 1997 monströse Mäuse gezüchtet. Um die Funktion eines Muskelproteins namens Myostatin zu untersuchen, manipulierten sie das Erbgut der kleinen Nager und schalteten das für die Produktion des Eiweißstoffes verantwortliche Gen ab. Das Ergebnis war frappierend: Aus den sonst so zierlichen Tiere waren muskelbepackte Riesennager geworden – Schwarzeneggermäuse, wie Lee seine Tiere nannte. Demnach hatten die Forscher mit dem Myostatin-Gen die Kontrolle für das Muskelwachstum abgestellt.



Auf demselben Effekt basiert übrigens die muskulöse Statur der Belgischen Blauweißen Rinder. Der Verlust des Myostatins ist hier allerdings nicht Ergebnis genetischer Manipulation, sondern langjähriger Kreuzung. Und auch Menschen scheinen ohne den Wachstumshemmer übermäßige Muskeln zu entwickeln. Vor viereinhalb Jahren kam in Berlin ein Junge mit einem entsprechenden Gendefekt zur Welt. Bereits nach der Geburt fiel seine ungewöhnliche Arm- und Beinmuskulatur auf. Heute kann das Kleinkind bereits eine drei Kilogramm schwere Hantel am ausgestreckten Arm halten. Wie sich die überdimensionierten Muckis langfristig auf die Gesundheit des Jungen auswirken, ist noch unklar. Kardiologen befürchten etwa Probleme im Herz-Kreislauf-System, denn auch der Herzmuskel scheint von der Mutation betroffen zu sein.

Myostatin ist aber nicht der einzige Faktor, der das Ausmaß der Muskulatur bestimmt, wie H. Lee Sweeny und Elisabeth Barton von der Universität von Pennsylvania in West Philadelphia bewiesen. Statt ein Gen auszuschalten, fügten sie eines hinzu: In ein harmloses Virus, eine so genannten Genfähre verpackt, schleusten sie die Erbinformation für den Wachstumsfaktor IGF-1 in die Zellen von Mäusen ein. IGF-1 unterstützt sowohl Wachstum als auch die Reparaturmechanismen von Muskelzellen. Sweeny und Barton behandelten auf diese Weise sowohl ungeborene als auch vier Wochen alte Nager – mit Erfolg. Die Tiere wurden größer als ihre Artgenossen und hatten deutlich mehr Muskeln, die sich auch mit fortschreiten-

Mit einem defekten Myostatin-Gen geboren, hatte ein Berliner Junge schon als Neugeborener eine ausgeprägte Arm- und Beinmuskulatur.

dem Alter nicht zurückbildeten. Ratten ließen sich ebenfalls derart verändern. Wurden die Tiere einem Training unterzogen, bei dem sie mit Gewichten auf dem Rücken kleine Leitern besteigen mussten, vergrößerten sich ihre Muskelpakete sogar noch. Das Erstaunlichste: Die dicken Muckis bildeten sich in der anschließenden Trainingspause nicht zurück.

Solche Forschungsansätze sind darauf ausgerichtet, genetische Erkrankungen wie die Muskeldystrophie, einen vererblichen Muskelschwund, zu heilen. Eine Gentherapie könnte vielleicht endlich Hilfe gegen das bislang tödliche Leiden bringen. Es besteht aber durchaus die Gefahr, dass diese Technik missbraucht wird, um die Leistungsfähigkeit von Sportlern zu steigern. Denn auch bei gesunden Menschen könnte ein zusätzlich eingebrachter Wachstumsfaktor zu übernatürlichem Muskelwachstum führen. Doch noch steckt die Gentherapie in den Kinderschuhen und die meisten Ansätze sind weit von einer Anwendung beim Menschen entfernt. So werden wohl einige Jahre ins Land gehen, bis der erste Genathlet auf einem olympischen Treppchen steht oder – wie Exzehnkämpfer Frank Busemann es ausdrückte – ein deutscher Läufer mit kenianischen Genen Rekorde bricht. ◁

Stefanie Reinberger ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

AP

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

INTERVIEW



Leistungssteigerung durch Gendoping?

Der Sportmediziner Bernd Wolfarth betreut am Münchner Klinikum rechts der Isar deutsche Hochleistungssportler. Er beschäftigt sich außerdem mit den molekularbiologischen Grundlagen der Ausdauerleistung.

Spektrum der Wissenschaft: Die genmanipulierte »Mighty Mouse« hat für einigen Wirbel gesorgt. Ist sie der erste Schritt zum Supersportler?

Dr. Bernd Wolfarth: Ich weiß nicht, ob es den jemals geben wird. Aber es ist durchaus denkbar, dass irgendwann gentechnische Methoden eingesetzt werden, um eine Leistungssteigerung zu erzielen. Das gilt vor allem für Bereiche, die Thema klinischer Forschung sind.

Spektrum: Zum Beispiel?

Wolfarth: Gentherapeutische Ansätze gegen Muskelschwund oder Blutarmut könnten natürlich auch dem Gesunden helfen, Muskeln aufzubauen beziehungsweise seine Hämoglobinmasse zu steigern.

Spektrum: Sind solche Fälle schon bekannt?

Wolfarth: Nein. Genmanipulierte Tiere wie die »Mighty Mice« haben natürlich Furore gemacht und die Presse greift solche Themen begierig auf. Es gab sogar Zeitungsartikel, die für Olympia 2002 die ersten genmanipulierten Sportler auf dem Podium vorhergesagt hatten. Das war und ist völliger Unsinn. Es gibt bislang keine uneingeschränkt in der Praxis eingesetzte und sicher funktionierende Gentherapie. Derzeit kämpft man noch damit, die zusätzliche Erbsubstanz gezielt und sicher an den Wirkungsort zu bringen. Erste Therapieversuche wurden immer wieder aufgegeben, weil es zu Komplikationen kam. In Frankreich erkrankten beispielsweise mehrere Kinder an Leukämie, nachdem sie wegen einer erblichen Immunschwäche gentherapeutisch behandelt wurden.

Spektrum: Müsste man also bei einem Gendoping mit größeren Problemen rechnen als bei den herkömmlichen Methoden?

Wolfarth: Auch Doping mit Amphetaminen oder Anabolika hat Nebenwirkungen. Aber bei genetischen Ansätzen sind diese nicht abschätzbar und stellen daher eine unkontrollierbare Gefahr dar. Ein Medikament kann man nach Beenden der Sportkarriere absetzen – eingeschleuste Gene wären weiter aktiv. Außerdem ist zu befürchten, dass sich das Ausmaß der Veränderungen nicht steuern lässt. Hält das Knochengerüst einem Zuviel an Muskeln stand? Ein solches Problem wurde bereits in Tierversuchen beobachtet, etwa bei Rindern, die wegen ihrer Muskelmassen nicht mehr stehen konnten.

Spektrum: Sie selbst erforschen Genvarianten, die Sie in Ihrer »Fitmap« allgemein zugänglich machen. Arbeiten Sie damit nicht dem Doping in die Hände?

Wolfarth: Im Gegenteil, unsere Kartierung ist auch eine präventive Maßnahme. Je mehr veröffentlicht wird und je gläserner die Forschung in diesem Bereich ist, umso eher kann man Missbrauch erkennen und vermeiden.

Spektrum: Sind Nachweisverfahren für Gendoping denn schon ein Forschungsthema?

Wolfarth: Natürlich. Irgendwann kommt der erste Fall und dann heißt es: Warum habt ihr euch darauf nicht vorbereitet? Die World Anti Doping Agency vergibt daher seit drei Jahren Gelder für Projekte, die zu Nachweismethoden beitragen. Klar kann man diese Ergebnisse auch umgekehrt für genmanipulative Methoden nutzen. Aber wir müssen wissen, in welchen Bereichen eine Manipulation möglich wäre, um geeignete Kontrollmethoden zu entwickeln.

Das Interview führte **Stefanie Reinberger**.

SPORTTECHNIK

Die Goldschmiede

In Berlin-Schöneweide bauen Ingenieure die besten Wettkampfboote und schnellsten Rennräder der Welt.

Von Bernd Müller

Materialdoping – auf diesen Begriff reagiert Harald Schaale allergisch. »Doping ist was Negatives. Wir bewegen uns aber immer im Rahmen der Regeln.« Wir, das sind die 50 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Instituts für Forschung und Entwicklung von Sportgeräten (FES), und Schaale ist ihr Direktor. Wenn deutsche Ruderer und Kanuten ihre schnittigen Boote im Olympiakanal von Athen zu Wasser lassen, geht ein Teil ihres Erfolgs auf das Konto des Instituts im Berliner Vorort Schöneweide – wie schon all die Jahre zuvor: In Sydney 2000 gewannen deutsche Athleten 20 von 57 Medaillen mit FES-Geräten, bei den Winterspielen 1998 in Nagano waren es 12 von 29. Die 2,7 Millionen Euro, die ein Trägerverein aus 22 Sportfachverbänden und dem Nationalen Olympischen Komitee pro Jahr zahlt, sind also gut angelegt. Für Direktor Schaale zählt nur eins: »Unser Ziel ist ein Wettbewerbsvorteil vor anderen Nationen.«

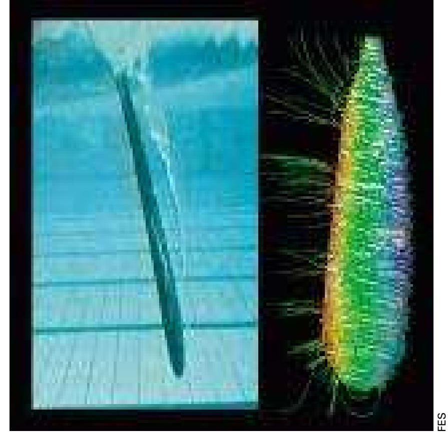
Ruderboote und Kajaks bilden dabei einen Forschungsschwerpunkt. Schon kurz nach den Sommerspielen 2000 begann Andreas Dalichow mit der Konzeption der neuen Modelle. Anhand von Wettkampfergebnissen entwirft der Projektleiter Rudern neue Bootsvarianten am Computer, ein Entwicklungszyklus dauert drei bis vier Jahre. Die Marschrichtung ist klar: Der Reibungsverlust zwischen Boot und Wasser muss so gering wie möglich sein, denn der frisst mit rund 90 Prozent den Löwenanteil der Energie, die der Ruderer aufbringt, weit mehr als Luftwiderstand und Materialverformung. Der Reibungsverlust wächst mit der vom Wasser benetzten Rumpfoberfläche, und diese versuchen die Ingenieure mit spezieller Konstruktionssoftware zu verringern. Seit vier Jahren schreibt das Reglement keine Mindestbreite der Boote mehr vor und Dalichows Entwürfe werden schlank wie Pfeile. Freilich gibt es Grenzen. »Irgendwo müssen die Ruderer ja noch sitzen«, schmunzelt der gelernte Schiffbauer, und genau hier liege die Herausforderung: physikalische Gesetze und die Bedürfnisse des Sportlers unter einen Hut zu bringen.

Ruderer haben mehr Gefühl

Das gilt auch für den Querschnitt der Boote. Eine Kugel besitzt bei gleichem Volumen die geringste benetzbare Oberfläche, daher fahren alle internationalen Spitzenteams mit Booten, deren Rumpf unter der Wasserlinie einen exakten Halbzylinder bildet. Weil das Boot dann instabil wird, legen die Entwickler den Schwerpunkt möglichst tief. Das durch die extrem leichte Haut aus Laminatschichten von Karbon und Harz gesparte Gewicht wird zudem an Bug und Heck zugegeben, um die Drehbewegung zu verringern. Trotzdem sind die Boote immer schwerer zu beherrschen. »Aber die Ruderer haben heute auch mehr Gefühl«, hat Dalichow festgestellt.

Natürlich spielt die Computersimulation am FES eine große Rolle. Doch die Strömung an der Grenze von Luft und Wasser, die sich zudem durch das Auf- und Abtauchen im Takt der Ruder und durch Wellen ständig verändert, lässt sich noch nicht verlässlich modellieren. So genannte Mehrkomponentensimulationen, wie sie in der Autoindustrie zwar propagiert, aber erst mit bescheidenem Erfolg eingesetzt werden, dürften für die Sportgeräteentwicklung erst in ein paar Jahren von Nutzen sein, meint Ralf Gollmick, Abteilungsleiter für computergestützte Konstruktion. »Die ideale Form eines Bootes mal kurz durchrechnen – das geht nicht.« Das Institut setzt stattdessen auf das in über vier Jahrzehnten angesammelte Know-how, das in umfangreichen Datenbanken gespeichert ist, aber laufend auch in Simulationssoftware einfließt. Dort werden Geometrien, Werkstoffe, Rennstrecken, Fahrzeiten, Regelwerke und nicht zuletzt Informationen über die Sportler abgelegt.

Leicht und dennoch möglichst steif – diese Devise gilt häufig bei Sportgeräten. Deshalb gibt es am FES eine eigene Abteilung, die sich mit neuen Laminatverbindungen aus Kohlefasern beschäftigt. Denn was sich die Konstrukteure am Computer ausdenken, muss schließlich in der Werkstatt umgesetzt werden. »Das Harz ist das schwächste Glied«, sagt André Pokorny, Verfahrenstechniker und für die Entwicklung neuer Materialien zuständig. Unter Hochdruck wird deshalb jeder Überschuss herausgepresst, bis das Bauteil wie ein Klotz aus Kohle aussieht, nur viel leichter und steifer. Falls ein Bauteil, etwa ein Fahrradrahmen,



FES

Wird aufgewandte Kraft beim Eintauchen eines Kajakpaddels gut in Antrieb umgesetzt? Zur Analyse messen die Ingenieure die Strömungsgeschwindigkeit (von blau nach rot zunehmend).

Die FES-Erfolgsgeschichte

Das Institut für Forschung und Entwicklung von Sportgeräten wurde 1962 in der DDR an der Deutschen Hochschule für Körperkultur und Sport gegründet. Große Erfolge feierte das FES in den 1980er Jahren vor allem im Radsport, etwa mit dem ersten karbonfaserverstärkten Fahrradrahmen. Im Einigungsvertrag als erhaltenswert eingestuft, dehnte das Institut nach der Wiedervereinigung seine Aktivitäten auf Bobs und Karbonschäfte für Gewehre aus. Nach der Fusion der Fördervereine von FES und IAT (Institut für angewandte Trainingswissenschaft an der Universität Leipzig) ist auch die Finanzierung durch öffentliche Aufträge zumindest vorerst gesichert.

doch mal bricht, hilft eine simple Methode bei der Ursachenforschung: Bei 350 Grad Celsius verbrennt das Harz, zurück bleiben die dünnen Karbonfaserschichten und die Rissstelle wird sichtbar.

»Wissen ist Gold wert«, bekräftigt Harald Schaale. Deshalb gebe es ständig Abwerbungsversuche, neuerdings aus Japan, wo ein neues Institut mit einem Etat von 40 Millionen US-Dollar dem FES den Rang ablaufen soll – bisher ohne Erfolg. Einige Nationen haben vergeblich versucht, an die FES-Erfolge heranzukommen, es fehlte meist die Kontinuität. So wurde das Australian Institute of Sport zur Olympiade in Sydney zwar mit 180 Millionen Dollar ausgestattet, nach den Spielen erlahmte aber das Interesse wieder. Zurzeit kauft Bahrain Sportwissenschaftler ein. Wo Geld nicht hilft, versucht man es mit illegalen Mitteln – wie Hacker aus Italien, die den E-Mail-Verkehr des FES abfangen wollten.

Doch die entscheidenden Informationen befinden sich ohnehin in den Köpfen der Mitarbeiter. Die arbeiten immer an mehreren Varianten gleichzeitig. Erst wenn die Sportler grünes Licht geben, kommt eine Konstruktion in die engere Wahl. Dann muss zum Beispiel ein neues Boot im 280 Meter langen Schleppkanal der Schiffbauversuchsanstalt in Potsdam unter Beweis stellen, dass der Reibungswiderstand im Wasser wirklich so gering ist wie berechnet. Dazu wird ein Zugarm mit einem Kraftmesser im Schwerpunkt des Boots befestigt und raue See über eine Wellenmaschine simuliert. Auch das Olympiaboot für die 470er Segelklasse, das komplett am FES entwickelt wurde, hatte hier seine erste Bewährungsprobe.

Die beiden Radfahrerlegenden Eddie Merckx (rechts) und Chris Boardman trennen scheinbar Welten: Letzterer bewältigt pro Stunde fast sieben Kilometer mehr. Doch ein Großteil dieser Leistung geht auf das Konto der Ausrüstung.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Neue Regeln, neue Räder

Während sich die FES-Experten bei Segelbooten auf ein bewährtes Reglement verlassen können, glich der Bau von Bahnrädern in den 1990er Jahren dem Wettlauf zwischen Hase und Igel. Kaum waren deutsche Pedalritter mit einem noch leichteren und schnelleren Fahrrad erfolgreich, wurde die Konstruktion über ein neues Regelwerk sofort verboten – um die Chancengleichheit zu wahren, lautete stets die Begründung. Doch neue Regeln setzt ein Institut wie das FES schnell wieder um und der Abstand in der sporttechnischen Ausstattung der Nationen wächst also eher noch.

Auch wenn manche Trainer behaupten, dass vor allem ihre ausgefeilten Trainingsmethoden zur Leistungssteigerung führen, ist für Harald Schaale klar: »Ohne Technologieentwicklung kann man heute keine Goldmedaille mehr gewinnen.« Welchen Anteil Technologie am Erfolg der Radler hat, zeigt die Entwicklung des Stundenweltrekords im »Bahnfahren«. 1972 kam Eddie Merckx in einer Stunde 49,40 Kilometer weit. Der aktuelle Rekord von Chris Boardman steht bei 56,70 Kilometern. Ein Triumph von Kraft und Ausdauer? Nachdem das Reglement für das Material verschärft wurde und die Techniker die meisten modernen Entwicklungen herauskonstruieren mussten, übertraf Boardman die Radsportlegende Merckx nur noch um zehn Meter. ◁

Der Physiker **Bernd Müller** ist freier Wissenschafts- und Technikjournalist in Esslingen.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Leichtes Spiel mit dem Schwerpunkt

Harte und weiche Stoßexperimente lassen sich im Kopf berechnen, wenn man die Bezugssysteme geschickt wählt.

Von Norbert Treitz

Die Physik beschreibt – frei nach Einstein – die Natur so einfach wie möglich, aber nicht einfacher. Von einem kurvenfahrenden Auto aus betrachtet, fliegen Häuser und Bäume auf krummen Bahnen um einen herum, angetrieben von Scheinkräften. Diesen Standpunkt einzunehmen ist nicht falsch, aber sehr ungeschickt. Eine viel einfachere Beschreibung gelingt in einem Inertialsystem, das heißt einem Bezugssystem, in dem die Gegenstände nicht Scheinkräften, sondern nur systeminternen Kräften, vor allem aber der eigenen Trägheit (lateinisch inertia) folgen. In diesem Fall sagt nämlich der Impulserhaltungssatz (das dritte der berühmten Gesetze aus Newtons »Principia mathematica«) sehr weit gehend, was *nicht* geschehen kann.

Hat man ein Inertialsystem, dann ist jedes Bezugssystem, das sich gegenüber diesem mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, ebenfalls ein Inertialsystem. (Konstant nach Richtung und Betrag, wohlgemerkt – rotierende Bezugssysteme sind nicht gemeint!) Mehr noch: Alle diese Systeme sind gleichberechtigt. Man kann sie durch (systeminterne) mechanische Experimente nicht voneinander unterscheiden. Insbesondere gibt es kein Bezugssystem, das man als absolut ruhend auszeichnen könnte. Das ist das Relativitätsprinzip. Mit der Relativitätstheorie hat es – fast – nur den Namen gemeinsam; es gilt auch schon in der klassischen (»nichtrelativistischen«) Mechanik, von der hier die Rede ist.

Unmittelbar erfahrbar ist es beim Eingießen von Getränken im fahrenden ICE oder auf der mit beachtlicher Tangentialgeschwindigkeit rotierenden Erde, die ja außerdem noch schneller um die Sonne und um die Mitte der Galaxis läuft: Man muss sich nicht im Geringsten um diese Geschwindigkeit kümmern und kann sie auch nicht mechanisch messen.

Bei aller Gleichberechtigung gibt es für jede Wechselwirkung zwischen zwei Objekten ein spezielles Inertialsystem, das dadurch ausgezeichnet ist, dass in ihm die Beschreibung noch einfacher geht: das gemeinsame Schwerpunktsystem. Es ist dasjenige System, in dem die Summe der Impulse gleich null und die Summe der Bewegungsenergien kleiner ist als in jedem anderen.

Im Folgenden soll es um Stöße gehen; das sind Wechselwirkungen, bei denen Impuls plötzlich, das heißt in ziemlich kurzer Zeit und bei ziemlich kurzen Laufwegen von einem Objekt zu einem anderen überspringt, sodass man die lan- ▷





Ein kleiner Ball auf einem großen hüpft überraschend hoch, wenn man beide zugleich fallen lässt.

▷ ge Zeit davor und die lange Zeit danach nahezu konstante Impulsvektoren hat. Ein Stoß heißt elastisch, wenn die Summe aller Bewegungsenergien vorher und nachher – nicht unbedingt während der Impulsübergabe! – gleich ist, und total inelastisch, wenn beide Objekte hinterher relativ zueinander ruhen. Dazwischen liegt die Mehrheit der realistischen Fälle, die uns aber zu kompliziert sind.

Spender gesucht: Zwei Bälle A und B stoßen elastisch zusammen. Dabei springt eine Impulsdifferenz $d\vec{p}$ von A nach B, das heißt, A hat nachher den Impuls $d\vec{p}$ weniger, B mehr als vorher, und wir wollen etwas spezieller annehmen, dass wir kein Überspringen von Drehimpuls zu betrachten haben. Wer gibt nun wem Bewegungsenergie? Wenn Ball A vorher ruht und nachher nicht mehr, ist er Empfänger von Energie. Wenn B vorher ruht, ist es umgekehrt: A ist Spender. Wegen des Relativitätsprinzips sind das möglicherweise nur zwei Beschreibungen desselben Vorgangs in zwei Inertialsystemen.

Wir können uns die Sache bequem machen und in allen Fällen das beiden Bällen gemeinsame Schwerpunktsystem verwenden: Vorher haben die Bälle zwei entgegengesetzte Impulse gleichen Betrags, nachher auch; allerdings hängen deren (entgegengesetzte) Richtungen von Details des Kontakts ab – die schlechte Billardspieler dem Zufall überlassen. Dank dieser Symmetrie muss man im Schwerpunktsystem nur drei Fälle unterscheiden: Die Beträge der beiden Impulse sind nach dem Stoß

- (a) größer als vorher,
- (b) so groß wie vorher oder
- (c) kleiner als vorher.

ZUR ERINNERUNG

Für den Impuls $\vec{p}$ und die kinetische Energie $\vec{E}$ eines Massenpunkts der Masse m, der sich mit der Geschwindigkeit $\vec{v}$ bewegt, gelten die Formeln

$\vec{p} = m\vec{v}$

und

$E = (m/2)\ v^2$

$\vec{v}$ und $\vec{p}$ sind Vektoren, was zum Beispiel bei der Addition von Impulsen zu beachten ist. Mit v (ohne Pfeil) wird der Betrag des Vektors $\vec{v}$ bezeichnet.

Der Fall (c) tritt vor allem bei Reibung auf, also Übergang von Energie in solche Formen, die man makroskopisch – wenn überhaupt – nur als Temperaturerhöhung bemerkt. Auch der Fall (a) kommt in der Realität vor, wenn nämlich im Stoß dem System Energie aus anderen Quellen zugeführt wird. Frösche und Knallfrösche sind typische Beispiele.

Fall (b) ist der elastische Stoß. Wegen der Betragsgleichheit der Impulse ist im Schwerpunktsystem nicht nur die Summe der Bewegungsenergien vorher und nachher dieselbe, sondern jeder der beiden Bälle bekommt am Ende seine Bewegungsenergie genau wieder; während des Kontakts kann sie ganz oder teilweise als Verformungsenergie zwischengelagert sein. Im Falle einer Anziehungskraft ist die Bewegungsenergie während des Kontakts sogar größer als vorher und nachher.

Beim elastischen Stoß zweier Objekte im gemeinsamen Schwerpunktsystem wird also zwar Impuls, aber keine Energie übertragen – ein gewöhnungsbedürftiges Ergebnis. Unter einem Wechsel des Bezugssystems ändern sich nicht nur Impulse und Energien, sondern möglicherweise auch die Rollen von Spendern und Empfängern der Energie.

Frontaler Zusammenstoß: Am Biertisch sitzen die Helden der Autobahn und diskutieren, welcher Unfall schwerer sei: wenn zwei gleich schwere Autos frontal mit den Geschwindigkeiten v und $-v$ zusammenstoßen, oder wenn eins davon steht und das andere von vorne mit $2v$ dagegen fährt. Sie meinen wegen der gleichen Geschwindigkeitsdifferenz, dass beides gleich schlimm sein müsse. Zwei Physikstudenten hören das und wissen es wegen der Formel für die Bewegungsenergie besser (Kasten links): Im zweiten Fall sei die Energie beider Wagen zusammen doppelt so groß und der Unfall also schlimmer. Wer hat Recht?

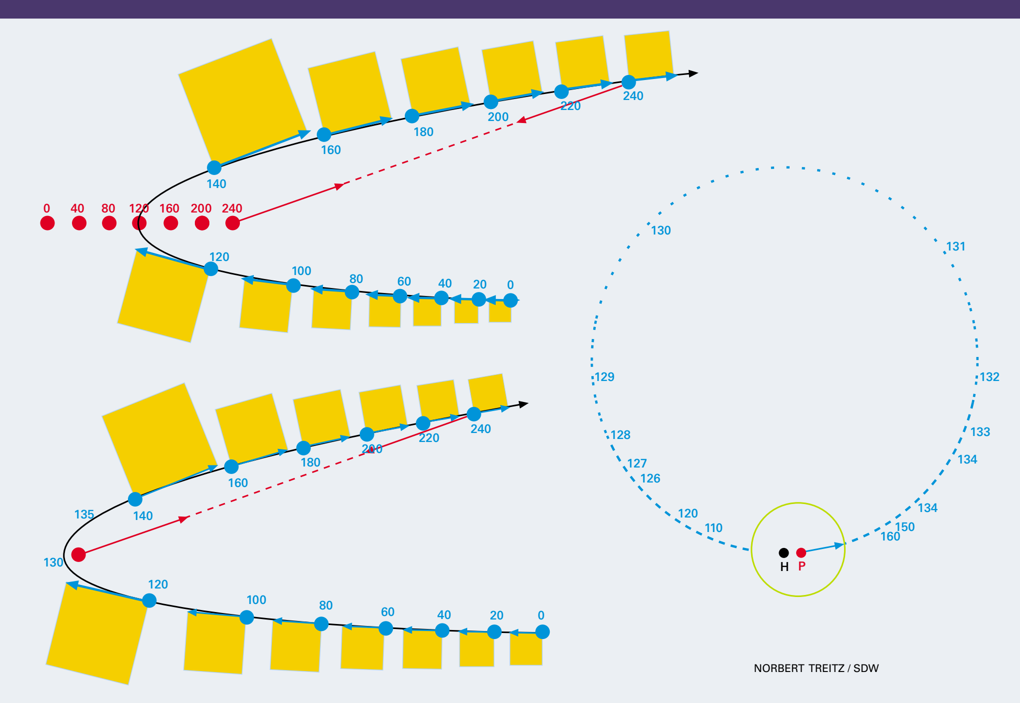
Der unmittelbare Stoß hat wenig mit den Geschwindigkeiten relativ zur Straße zu tun, und die für Zerstörung oder Verformung »nutzbare« Energie ist die Bewegungsenergie im Schwerpunktsystem, also in beiden Fällen die gleiche. Insofern haben die Biertischexperten Recht. Der Unterschied kann aber bei einem Folgeereignis bedeutsam werden: Im zweiten Fall bewegt sich der gemeinsame Schwerpunkt weiter, gedämpft durch Reibung mit der Straße, und die Autos können von der Fahrbahn abkommen und gegen Bäume oder Häuser prallen. Wenn also jemand von hinten mit 150 km/h auf einen Wagen mit 140 km/h fährt, so ist das nicht gefährlicher als ein Stoß mit 10 km/h auf einen ruhenden Wagen, vorausgesetzt, man macht das nicht auf der schmalen Autobahn, sondern auf dem Großen Salzsee ohne Hindernisse rundherum.

Aus dem gleichen Grund ist in der Elementarteilchenphysik entscheidend, welche Energie die zusammenprallenden Teilchen in ihrem gemeinsamen Schwerpunktsystem haben. Ein Collider, in dem Elementarteilchen frontal aufeinander geschossen werden, erzielt weit höhere Kollisionsenergien als ein klassischer Beschleuniger, der die Teilchen gegen ein ruhendes Target schleudert. In der Relativitätstheorie ist zwar der Zusammenhang zwischen Energie und Impuls anders als in der klassischen Physik, das Ergebnis ist jedoch qualitativ ganz ähnlich.

Huckepack fallende Bälle: Lassen Sie mit zwei Händen zwei deutlich verschieden schwere Bälle von möglichst guter Elastizität wenige Dezimeter tief auf den Tisch fallen derart, dass beim Start der leichte lose genau mitten auf dem schweren liegt. Der leichte springt dann überraschend hoch und übersteigt dabei seine Starthöhe (Bild S. 101). Offenbar bekommt er Energie vom schweren, aber wieso?

Mit einer Betrachtung im gemeinsamen Schwerpunktsystem kann man das fast ohne Rechnung einsehen: Der erste Stoß erfolgt zwischen dem unteren, schweren Ball und der noch viel schwereren Erde. Das gemeinsame Schwerpunktsystem unterscheidet sich fast gar nicht vom Laborsystem, in dem die Beobachter auf der Erde sitzen. Wenn wir die Geschwindigkeit am Ende des freien Falls $-v$ nennen, so kehrt der Ball beim Kontakt mit dem Tisch (beziehungsweise dem Planeten) nach oben um und steigt mit $+v$ auf. Der leichte ist aber immer noch mit $-v$ unterwegs, und beide bekommen nun einen engeren Kontakt, während der untere Ball den Kontakt zum Planeten verliert. Wenn wir nun idealisierend die Masse des kleinen Balls als vernachlässigbar gering annehmen, ruht der schwere Ball im gemeinsamen Schwerpunktsystem beider Bälle; der leichte kommt von oben mit $-2v$ in diesem Schwerpunktsystem an und wird

Die Swing-by-Technik



Eine Raumsonde (blau) fliegt fast frontal auf einen Planeten (rot) zu und umrundet ihn in einer sehr eng anliegenden Hyperbel. Das linke Bild zeigt oben die Bahn im heliostatischen Bezugssystem (in dem die Sonne ruht), darunter dieselbe Bahn im Schwerpunktsystem von Planet und Raumsonde, das wegen der geringen Masse der Letzteren mit dem Bezugssystem des Planeten praktisch identisch ist. Die gelben Quadrate an den Geschwindigkeitsvektoren zeigen die Bewegungsenergie des Raumschiffs an, gemessen im jeweiligen Bezugssystem; die kleinen blauen Zahlen bezeichnen Zeitpunkte in willkürlichen Einheiten.

Das rechte Bild zeigt die Geschwindigkeit des Raumschiffs (Endpunkte der Geschwindigkeitsvektoren) zu den verschiedenen Zeiten des Swing-by-Vorgangs. In dieser Darstellung (dem »Geschwindigkeitsraum«) unterscheiden sich beide Bezugssysteme nur durch die Lage *H* bzw. *P* des Nullpunkts und die Bahn der Raumsonde ist ein Kreis, der im Grenzfall der Parabelbahn durch *P* geht. Der kleine grüne Kreis um *P* enthält alle Geschwindigkeiten, die zu der Bewegungsenergie »unendlich weit« vor und nach dem Stoß gehören, also bei maximaler Energie des Schwerefelds, die ebenso bequem wie irreführend als Nullpunkt der Energie verwendet wird.

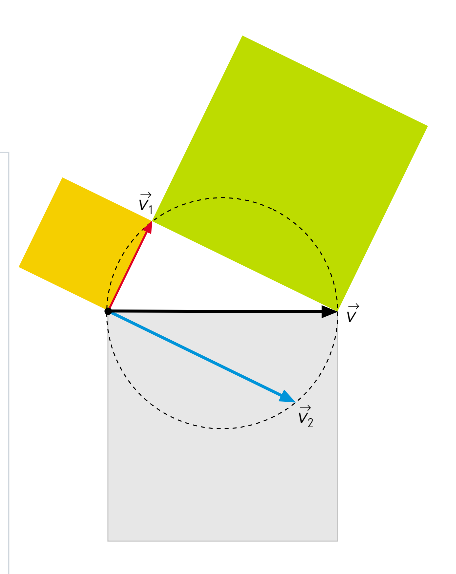
durch den Kontakt reflektiert, also hat er nachher $+2v$ darin und $+3v$ im Laborsystem Erde. Damit steigt er bis zum Neunfachen der Starthöhe, denn die Bewegungsenergie geht quadratisch mit der Geschwindigkeit, und die Schwereenergie ist so gut wie proportional zur Höhe (»homogenes Feld«).

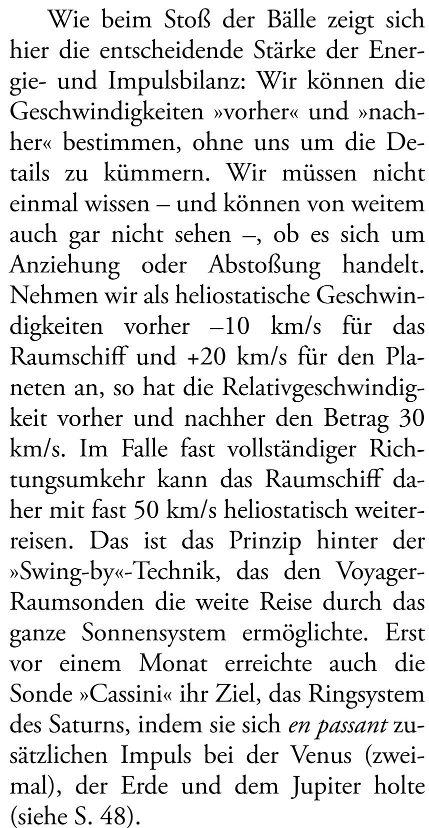
Etwas mehr rechnen muss man, wenn der leichte Ball nicht mehr unendlich leicht ist. Wenn Sie zwei Bälle guter Elastizität mit einem Massenverhältnis von 1 : 3 haben, können Sie einen vollständigen Transfer der im Laborsystem vorhandenen Bewegungsenergie erreichen: Auch hier hat der schwere Ball nach dem ersten Stoß die Geschwindigkeit $+v$ und der leichte $-v$, aber der gemeinsame Schwerpunkt steigt mit $+v/2$. Relativ zu diesem hat daher zwischen den beiden Stößen der schwere Ball die Geschwindigkeit $+v/2$ und der leichte $-3v/2$. Beide drehen beim zweiten Stoß nur die Vorzeichen um, und die Rückrechnung ins Laborsystem ergibt 0 für den schweren und $+2v$ für den leichten. Dieser kann also auf die vierfache Starthöhe steigen, während der schwere ohne irgendwelche Reibungsvorgänge sofort am Boden ruht. Dagegen würde er in dem idealisierten ersten Fall so hoch springen, als gäbe es den leichten gar nicht, also bis zur Starthöhe.

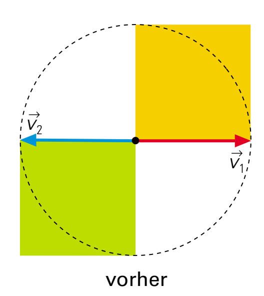
Die Bewegungsenergie im Laborsystem war vor beiden Stößen $2mv^2$, wenn wir die Massen m und $3m$ nennen. Nach beiden Stößen hat der leichte Ball diese Energie ganz für sich allein.

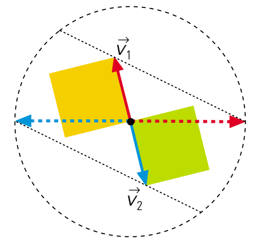
Planeten als Impulsspender: Nehmen wir an, dass wir eine Fernsehkamera mit Zubehör zu fernen Planeten schießen wollen, um sie und ihre Satelliten aus der Nähe anzusehen. Leider ist der gravitative Potenzialtopf der Sonne sehr tief, und wir kreisen mit der Erde ziemlich weit unten darin. Wenn das Raumschiff heliostatisch (das heißt relativ zu einem Inertialsystem, in dem die Sonne ruht) mit 10 km/s läuft, ist das schon nicht schlecht, aber viel zu wenig. Wenn man das Gerät mit 10 km/s gegen einen hinreichend elastisch gepolsterten Planeten wirft, hat seine Geschwindigkeit nach dem Abprallen eine andere Richtung und denselben Betrag – relativ zum Planeten. Wenn der aber seinerseits in Bewegung ist, kann sich die heliostatische Geschwindigkeit des Raumschiffs erheblich ändern.

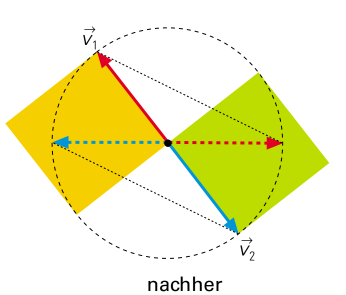
Nur sind Planeten leider nicht gepolstert und auch aus anderen Gründen als Reflektoren für Raumschiffe ungeeignet. Da hilft ein Trick: Für einen abrupten Richtungswechsel auf dem Schulhof kann man, statt sich von einer Wand abzustoßen, auch um eine Säule oder einen freundlicherweise anwesenden Mitschüler herumschwingen. Im letzteren Fall bewirken die Arme eine Anziehung. Planeten stellen uns hierzu ihr Gravitationsfeld zur Verfügung. Zielt das Raumschiff knapp neben den Planeten, so läuft es im gemeinsamen Schwerpunktsystem auf einer Hyperbel. Von dieser brauchen wir fast nur die Asymptoten als Näherung für Hin- und Rückweg. Wenn der Planet nicht punktförmig ist, dann ist eine Richtungsänderung um 180 Grad allerdings nicht erreichbar, weil der Scheitel der Bahn sonst in den Planeten eintauchen müsste. Weit draußen auf den Asymptoten haben wir in gleichen Abständen gleiche Beträge der Geschwindigkeit des Raumschiffs – relativ zum Planeten. Uns interessieren aber die heliostatischen Geschwindigkeiten. ▷











Beim elastischen Stoß zweier Billardbälle, dargestellt im Geschwindigkeitsraum (links im Laborsystem, oben im Schwerpunktsystem), ist die Gesamt-Bewegungsenergie hinterher die gleiche wie vorher, wie aus dem Satz des Pythagoras folgt. Nur während des Stoßes steckt ein Teil der Energie in der Deformation der Bälle.

▷ Wie beim Stoß der Bälle zeigt sich hier die entscheidende Stärke der Energie- und Impulsbilanz: Wir können die Geschwindigkeiten »vorher« und »nachher« bestimmen, ohne uns um die Details zu kümmern. Wir müssen nicht einmal wissen – und können von weitem auch gar nicht sehen –, ob es sich um Anziehung oder Abstoßung handelt. Nehmen wir als heliostatische Geschwindigkeiten vorher –10 km/s für das Raumschiff und +20 km/s für den Planeten an, so hat die Relativgeschwindigkeit vorher und nachher den Betrag 30 km/s. Im Falle fast vollständiger Richtungsumkehr kann das Raumschiff daher mit fast 50 km/s heliostatisch weiterreisen. Das ist das Prinzip hinter der »Swing-by«-Technik, das den Voyager-Raumsonden die weite Reise durch das ganze Sonnensystem ermöglichte. Erst vor einem Monat erreichte auch die Sonde »Cassini« ihr Ziel, das Ringsystem des Saturns, indem sie sich *en passant* zusätzlichen Impuls bei der Venus (zweimal), der Erde und dem Jupiter holte (siehe S. 48).

Allgemein kann das weitaus leichtere Objekt fast das Doppelte der Geschwindigkeit des schwereren zugewinnen; das gilt für jedes Inertialsystem. Aus diesem Grund ist auch ein vorher fast ruhender Tischtennisball doppelt so schnell wie der Schläger.

Pythagoreisches Billard: Beim Billard sind die Bälle gleich schwer. Deswegen läuft die Addition ihrer Impulse auf die Addition ihrer Geschwindigkeiten hinaus. Die Darstellung im Geschwindigkeitsraum, die wir im Kasten auf der vorigen Seite kennen gelernt haben, liefert hier überraschend schnell ein klares Bild.

Ein Billardball trifft mit der Geschwindigkeit $\vec{v}$ einen auf dem Tisch ruhenden Ball. Im Geschwindigkeitsraum liegen die Bälle vor dem Stoß im Schwerpunktsystem symmetrisch im Abstand $v/2$ vom Nullpunkt. Das muss nach einem elastischen Stoß wieder so sein (nicht aber während dessen). Die Eintragungen liegen also hinterher auf dem gleichen Kreis mit Radius $v/2$ um den Nullpunkt einander gegenüber. (Bei einer Bewegung in allen drei Dimensionen ist der Kreis durch eine Kugel zu ersetzen.) Nennen wir die neuen Geschwindigkeiten $\vec{v}_1$ und $\vec{v}_2$, so bilden die Punkte 0, $\vec{v}$, $\vec{v}_1$ und $\vec{v}_2$ die Ecken eines Rechtecks (Bild links, oben).

Dem Übergang vom Schwerpunkt- zum Laborsystem – das heißt dem System, in dem der Billardtisch ruht – entspricht im Geschwindigkeitsraum nichts weiter als eine Verschiebung des Nullpunkts. Der Vektor $\vec{v}$, also die Geschwindigkeit des stoßenden Balls vorher, ist nun die Diagonale des Rechtecks oder, wenn man das Rechteck entlang dieser Diagonale halbiert, die Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreiecks. Dessen Katheten werden durch die beiden Geschwindigkeitsvektoren »nachher« gebildet (Bild links, unten).

Auf diese schlichte Weise erkennt man nicht nur, dass nach dem Stoß die Bälle auf zueinander rechtwinkligen Bahnen einander davonlaufen, sondern auch, dass die gesamte Bewegungsenergie wieder erreicht wird. (Sie bleibt streng genommen nicht erhalten, weil sie während des Stoßes teilweise als elastische Energie zwischengelagert wird.) Denn nach dem Impulserhaltungssatz muss $\vec{v}$ die Vektorsumme aus $\vec{v}_1$ und $\vec{v}_2$ sein, das heißt, die drei Vektoren müssen ein Dreieck bilden, und nach dem Satz des Pythagoras muss dieses Dreieck rechtwinklig sein, denn aus der Energiebilanz folgt (wegen der gleichen Massen) $v^2 = v_1^2 + v_2^2$.

Während des Stoßes wandern die Spitzen der Pfeile $\vec{v}_1$ und $\vec{v}_2$ auf geraden Linien von der Anfangs- zur Endposition. Unterwegs ist das Dreieck nicht rechtwinklig und die Quadratsumme der Geschwindigkeiten vorübergehend kleiner als v^2, denn ein Teil der Energie wird als Deformationsenergie zwischengelagert. Die Richtung der übertragenen Impulsdifferenz haben wir bisher als zufällig angesehen. Bei kugelrunden Bällen ist sie einfach die Richtung zwischen den Mittelpunkten während des Kontakts. Ein fast genau vorwärts weglaufender Ball bekommt fast die ganze Energie, ein fast rechtwinklig weggestoßener fast gar keine. Welcher Ball das jeweils ist, ist beim fast genau zentralen Stoß anders als beim knapp streifenden.

Wahrscheinlich hat Pythagoras von Samos nicht Billard gespielt. Eigentlich schade, denn er hätte eine schöne Anwendung für den nach ihm benannten Satz finden können: die Umverteilung der Bewegungsenergie beim Billardstoß. ◁



Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche und möglichst freihändige Versuche und Basteleien sowie anschauliche Erklärungen dazu nutzt er nicht nur für die Ausbildung von Physiklehrkräften, sondern auch zur Förderung hochbegabter Kinder und Jugendlicher.

Nüsse & Rosinen. Von Norbert Treitz. CD mit Buch. Harri Deutsch, Frankfurt (Main), in Vorbereitung

Brücke zur Physik. Von Norbert Treitz. 3. Auflage, Harri Deutsch, Frankfurt (Main) 2003

Spiele mit Physik! Von Norbert Treitz. 4. Auflage, Harri Deutsch, Frankfurt (Main) 1996

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

GEOGRAFIE

Werner Bätzing

Die Alpen

Geschichte und Zukunft einer europäischen Kulturlandschaft

C. H. Beck, München 2003. 431 Seiten, € 34,90

Die moderne Nutzung in der Industrie- und Dienstleistungsgesellschaft gefährdet die ökologische Stabilität und biologische Vielfalt des hochsensiblen Lebensraums Alpen. Die Rückkehr zur vorindustriellen Gesellschaft ist undenkbar. Ziel ist daher, die modernen Wirtschafts-, Lebens- und Kulturformen mit traditionellen Erfahrungen zu einem langfristig tragfähigen Gesamtkonzept zu verbinden. Mit diesem Buch leistet Werner Bätzing, Professor für Kulturgeografie an der Universität Erlangen-Nürnberg, seinen Beitrag dazu.

Der hochmittelalterliche Siedlungsausbau war von derselben Dynamik wie die industrielle Revolution

Nur zu Beginn des ersten Kapitels »Die Alpen im Agrarzeitalter« beschäftigt sich der Autor mit der physischen Geografie: Klima, Vegetation und Geologie. Danach dominieren durchwegs human- und kulturgeografische Themen, abgehandelt in strikt chronologischer Folge. Bätzing schreibt über die ersten Bauerngesellschaften, die aus dem Orient kommend um 5500 v. Chr. den Südwestrand der Alpen erreichten, die Bronzezeit mit ihrem starken Wirtschaftsaufschwung, die Eisenzeit und Einflüsse der Römer wie etwa Weinanbau und ein gut ausgebautes Straßennetz.

Mit dem Zerfall des Römischen Reiches im 5. Jahrhundert entvölkerten sich die Alpen; erst um das Jahr 1000 setzte der hochmittelalterliche Siedlungsausbau ein, eine Umgestaltungsphase, die in ihrer Dynamik nur noch mit der industriellen Revolution im 19. Jahrhundert vergleichbar ist. Voraussetzungen hierfür waren die politische Konsolidierung Europas nach den militärischen Siegen über die Ungarn und Sarazenen sowie eine signifikante Klimaerwärmung. Damals entstand jene traditionelle Welt im Alpenraum, die erst im 20. Jahrhundert untergegangen ist.

Die folgenden zwei Kapitel behandeln diesen Untergang und den darauf folgenden großen Strukturwandel – der sich sehr ungleichmäßig ausprägt, da der Alpenraum in den verschiedenen Anrainerstaaten einen sehr unterschiedlichen politischen, wirtschaftlichen, kulturellen und mentalen Stellenwert hat.

In föderalistischen Staaten wie der Schweiz oder Österreich haben periphere Räume in der nationalen Politik eine erhebliche Bedeutung, was sich in vergleichsweise guten Fördermaßnahmen und geringen räumlichen Disparitäten niederschlägt. Im eigentlich zentralistischen Freistaat Bayern spielen die Alpen eine wichtige Rolle für das Selbstbild des modernen Bayern mit »Laptop und Lederhose«. So kommt es, dass die bayerischen Alpen der mit Abstand am stärksten durch flächenhafte Übernutzung geprägte Teilraum sind: Sein Bevölkerungswachstum wird lediglich von den Zwergstaaten Monaco und Liechtenstein übertroffen.

Zentralistische Staaten wie Italien und Frankreich dagegen tendieren dazu, die Alpen als monofunktionalen »Ergänzungsraum« zu sehen, vor 1945 zur militärischen Grenzsicherung, danach für Freizeit und Erholung. In Italien haben sich traditionelle Strukturen noch am stärksten erhalten, wenn auch in überalterten und erstarrten Formen. Nicht zufällig findet hier zurzeit die größte Entsiedlung statt. Frankreich dagegen hat seit der Verabschiedung des Berggebietsgesetzes 1985 die Trendumkehr geschafft: Seit gut 20 Jahren wächst in seinen Alpenregionen die Bevölkerung wieder erheblich an.

Im abschließenden Abschnitt entwickelt der Autor seine Leitidee der »ausgewogenen Doppelnutzung«: Eine nachhaltige Zukunft ist nur realisierbar, wenn die Alpen sich weder von Europa abschotten noch in die Einzugsbereiche der einzelnen Großstädte zerfallen, sondern ein eigenständiger und multifunktionaler Lebens- und Wirtschaftsraum bleiben oder wieder werden. Hilfreich bei der Umsetzung dieser Idee wäre die Alpenkonvention oder die EU-Gemeinschaftsinitiative Interreg III, die der Förderung der großräumigen transnationalen Zusammenarbeit dient. Die Fortsetzung der gegenwärtigen Wirtschaftsweise würde die ökologischen und kulturellen Grundlagen des Alpenraums zerstören.

Es bleibt zu hoffen, dass möglichst viele aktuelle und zukünftige Entscheidungsträger dieses äußerst empfehlenswerte Buch lesen und sich zu Herzen nehmen.

Gunther Jauk

Der Rezensent ist Diplomgeograf und Wissenschaftsjournalist in Graz.



Eine unternutzte Almfläche im Gasteiner Tal in 1800 Meter Höhe: Die Zwergsträucher breiten sich wieder aus, und die Artenvielfalt geht zurück.

BILDBAND

Art Wolfe (Fotos) und Art Davidson (Essays)

Landschaften zwischen Himmel und Erde

Aus dem Amerikanischen von Eva Dempewolf.
Frederking & Thaler, München 2004. 240 Seiten, € 50,–



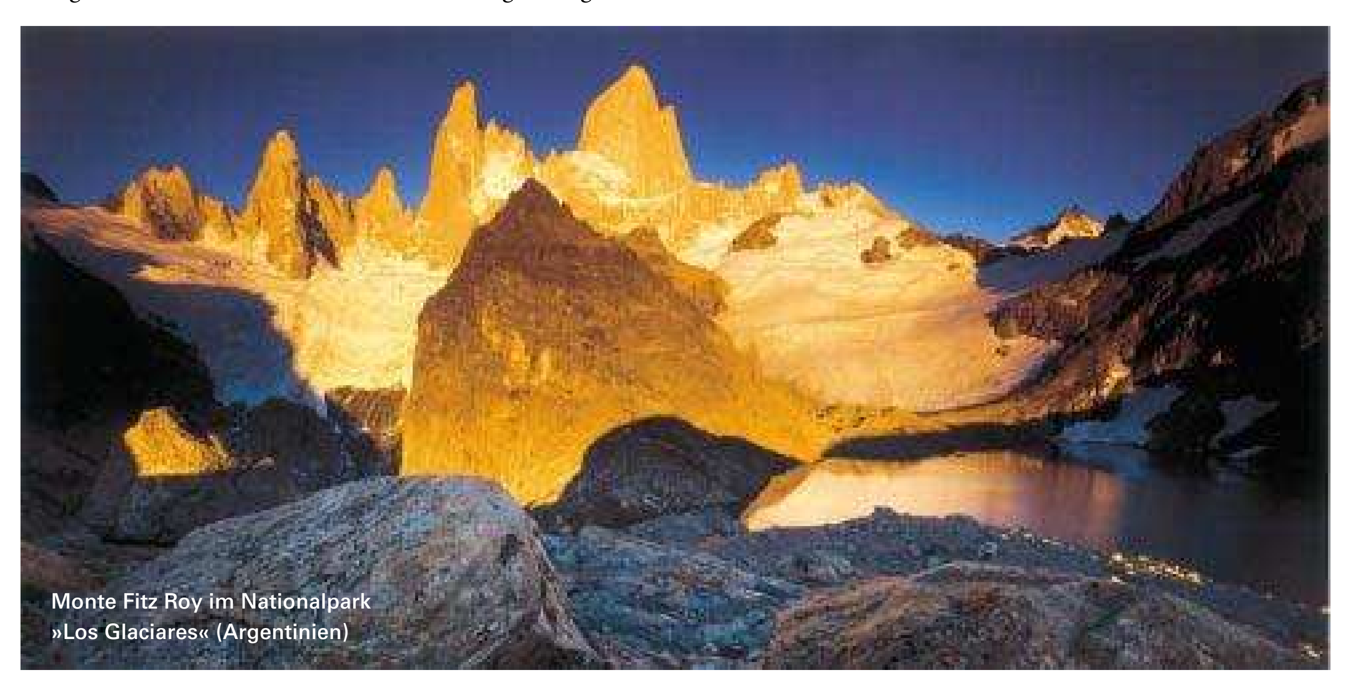
Lesen Sie über die Werbepausen hinweg. In mehreren über das Buch verteilten »Essays« versucht der Publizist Art Davidson uns immer wieder von derselben Botschaft zu überzeugen: Die Natur ist grandios, vor allem die unberührte, der Mensch ist schlecht, weil er sie zerstört, aber einige wenige Berufene haben den heroischen Kampf um ihre Erhaltung aufgenommen, insbesondere die 1970 gegründete Organisation Natural Resources Defense Council (NRDC), zu deren Werbeträger sich das Buch macht. Nichts gegen die Botschaft; es ist nur die Wiederholung, die stört.

Die Stärke von Art Wolfe liegt in den Bergen. Eigentlich hat er Malerei studiert, und in der Tat sind seine besten Landschaftsbilder komponiert wie Gemälde, mit Sonnenuntergängen, deren wilde Farben man im normalen Leben kaum zu sehen bekommt. Unglaublich, wie viele günstig gelegene Bergseen er gefunden hat, die er als Naturspiegel zu verwenden wusste. Wüsten und Meere konnte er nicht ganz so eindrucksvoll in Szene setzen.

Aber die besten Bilder möchte man sich am liebsten noch viel größer an die Wand hängen.

Alice Krüßmann

Die Rezensentin ist Bildredakteurin bei Spektrum der Wissenschaft.



Monte Fitz Roy im Nationalpark »Los Glaciares« (Argentinien)

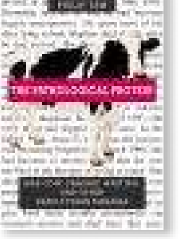
MEDIZIN

Philip Yam

The Pathological Protein

Mad Cow, Chronic Wasting, and Other Deadly Prion Diseases

Copernicus, New York 2003. 290 Seiten, $ 27,50



Sie gehören zu den zähesten und tödlichsten Krankheitserregern, die dem Menschen bekannt sind – kochendes Wasser und gängige Sterilisationsmethoden können ihnen nichts anhaben. Und sie existieren in jedem Menschen: Prionproteine.

Aber erst wenn sich diese Eiweiße in Nervenzellen zu einer fehlerhaften Form auffalten, erlangen sie ihr fatales Potenzial: Dann verursachen sie sowohl die Creutzfeldt-Jakob-Krankheit des Menschen als auch die Traberkrankheit bei Schafen, die Rinderseuche BSE und andere tödlich verlaufende Hirnerkrankungen von Mensch und Tier.

Diesen Prionen-Erkrankungen hat Philip Yam, Redakteur bei Scientific American, sein schriftstellerisches Erstlingswerk gewidmet. Von den ersten Beobachtungen mysteriöser neurologischer Krankheiten zu Beginn des 20. Jahrhunderts bis zu den neuesten Erkenntnissen der molekularbiologischen Prionenforschung verfolgt Yam die Entdeckungsgeschichte dieser außergewöhnlichen Krankheitserreger.

Stephen Churchill, 19, stirbt 1995 binnen eines Jahres an einer mysteriösen Krankheit, die ihn zuletzt in völliger Demenz versinken lässt. Die Autopsie legt einen massiven Verfall seines Gehirns offen: Ganze Areale sind von mikroskopisch feinen Löchern durchsiebt, das zerstörte Nervengewebe sieht unter dem Mikroskop aus wie ein Schwamm. Die Diagnose ist klar, aber höchst ungewöhnlich: Creutzfeldt-Jakob-Krankheit (CJD), ein sehr seltenes Leiden, das normalerweise erst bei älteren Menschen zu geistigem Verfall und Tod führt.

Die Entdeckung untypischer Amyloidplaques im Nervengewebe von Stephen

führt Yam und seine Leser ins Neuguinea der 1950er Jahre, wo der exzentrische Neurologe Carleton Gajdusek versucht, der rätselhaften Kuru-Epidemie der eingeborenen Papua auf die Spur zu kommen. Der Nachweis des Übertragungswegs brachte ihm 1976 den Nobelpreis ein: Verstorbene Stammesangehörige wurden verspeist und mit ihnen die Krankheitserreger aus dem Nervengewebe – die Toten infizierten ihre kannibalischen Stammesgenossen.

Doch welcher Natur war dieser Erreger? Yam versteht es hervorragend, die Spannung der jahrzehntelangen Fahndung nach der geheimnisvollen Ursache der Hirnkrankheiten auf seine Leser zu übertragen. Der Erreger war viel zu klein, um ein Bakterium oder ein Virus zu sein, und außerdem wesentlich unempfindlicher als alle bis dahin bekannten Keime. Schließlich wagte es Stanley Prusiner nach Ausschluss aller anderen Möglichkeiten als Erster, das Unmögliche zu postulieren: Kein herkömmlicher Krankheitserreger, sondern allein ein Protein musste hinter den rätselhaften Nervenkrankheiten stecken.

Ein Dogma der Mikrobiologie war gebrochen. Eine Krankheit, die sich ohne Erbgut übertragen und verbreiten sollte? Undenkbar! Obwohl die Priontheorie auch heute noch nicht unumstritten ist, wurde Prusiners Forschung 1996 mit dem ruhmträchtigen Anruf aus Stockholm belohnt.

Derweil waren Prionen-Erkrankungen in den Mittelpunkt auch des gesellschaftlichen Interesses gerückt: durch den Ausbruch der BSE-Seuche in den 1980er Jahren und das anschließende Auftauchen einer neuen Variante der CJD, die nicht nur Stephen Churchill, sondern bis März 2003 noch mehr als 130 weitere, meist junge Menschen das Leben gekostet hat.

Mit diesen Ereignissen wird Yams wissenschaftlicher Krimi zu einem politischen; er ruft die gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Folgen der BSE-Krise ins Gedächtnis, die besonders Großbritannien bis heute beschäftigen. Das endgültige Eingeständnis der damaligen Regierung unter Premierminister Major, dass die Rinderseuche nicht nur eine rein veterinärmedizinische Katastrophe ist, sondern auch auf den Menschen übertragbar sein könnte, war für die Briten und für alle von BSE betroffenen Länder ein traumatisches Erlebnis. ▷

▷ Als US-Amerikaner geht Yam auch auf die spezifischen Probleme seines Landes ein: Bei BSE handelt es sich nicht nur um eine Gefahr »da draußen« im alten Europa; auch die »Chronic Wasting Disease«, die bei Hirschen und Elchen Nordamerikas auftritt, könnte wie BSE auf den Menschen übertragbar sein.

Insgesamt stellt Yams erstes Buch ein solides Stück Journalismus dar: spannend geschrieben, aber fern von Sensationsmacherei; anspruchsvoll, aber auch für naturwissenschaftliche Laien hervorragend verständlich und schließlich voll interessanter Details und Anekdoten, die in ihrer Gesamtheit den perfekten Spannungsbogen halten. So merkt der Leser kaum, dass er durch einfaches Schmökern unglaulich viele Informationen aufnimmt.

Einziger Wermutstropfen: Die wenigen Abbildungen von kranken Tieren, Fleisch verzehrenden Politikern und Hirnarealen ergänzen zwar den erzählenden Charakter des Buchs, aber die eine oder andere zusätzliche sachliche Abbildung hätte doch zum Verständnis mancher Mechanismen beigetragen. So hätte eine dreidimensionale Strukturabbildung des Prionmoleküls den – zweifelsohne sehr anschaulichen – Erklärungen Yams zur Prionenstruktur wertvolle Schützenhilfe gewähren können. Ist es doch gerade die Formänderung vom normalen zum pathogenen Protein, die Prionen so gefährlich macht.

Moritz Nowack

Der Rezensent hat Biologie studiert und promoviert zurzeit am Max-Planck-Institut für Züchtungsforschung in Köln.

MEDIZIN

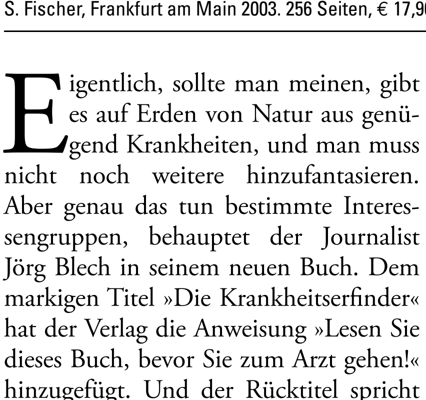
Jörg Blech

Die Krankheitserfinder

Wie wir zu Patienten gemacht werden

S. Fischer, Frankfurt am Main 2003. 256 Seiten, € 17,90





Eigentlich, sollte man meinen, gibt es auf Erden von Natur aus genügend Krankheiten, und man muss nicht noch weitere hinzufantasieren. Aber genau das tun bestimmte Interessengruppen, behauptet der Journalist Jörg Blech in seinem neuen Buch. Dem markigen Titel »Die Krankheitserfinder« hat der Verlag die Anweisung »Lesen Sie dieses Buch, bevor Sie zum Arzt gehen!« hinzugefügt. Und der Rücktitel spricht von einem »Aufklärungsbuch«, in dem der Autor »enthüllt, wie wir systematisch zu Patienten gemacht werden«.

So viel Anmache macht misstrauisch. Schon wieder einer dieser endlos vielen Gesundheitsratgeber über Analfisteln, Pilzbefall oder das Zappelphilippsyndrom, die beim Leser außer Panik nichts bewirken?

Der provokante erste Eindruck täuscht: Der Inhalt des Buchs stimmt weniger nutzlos-aufgeregt als zutiefst nachdenklich. Jörg Blech will an diversen Beispielen aufzeigen, wie Krankheiten erfunden werden, um pharmazeutischen Unternehmen neue Märkte für ihre Produkte zu erschließen und Arztpraxen schleichend in Verkaufsstätten umzuwandeln. Dies gelingt zumeist, indem hinlänglich bekannte Krankheitsbilder so erweitert oder umgedeutet werden, dass aus einem Gesunden ein Kranker oder zumindest irgendwie Behandlungsbedürftiger wird.

Da gibt es etwa das »Aging Male Syndrome«, die Menopause des Mannes. Die wissenschaftliche Basis für die »männlichen Wechseljahre« ist dürftig. Nichtsdestotrotz propagieren Hormonfirmen die »Andropause« als ernste, weit verbreitete Erkrankung mit Symptomen wie Stimmungsschwankungen, Schlafstörungen und Leistungsabfall, denen mit Testosteron-Gelen in Monatspackungen ab 65 Euro abzuhelfen sei.

Wenn man wirklich zum Arzt muss, sollte man dieses Buch nicht lesen

Ein besonders schönes Beispiel dafür, wie man sich therapiebedürftige Menschen generieren kann, ist die sexuelle Unlust der Frau. Zur »weiblichen sexuellen Dysfunktion« pathologisiert, soll sie ausgerechnet mit dem Medikament kurierbar sein, das den Hersteller Pfizer zur weltgrößten Pharmafirma hat aufsteigen lassen: der Männerpille Viagra – einzunehmen, wohlgemerkt, von der Frau.

Keine »Indikationserweiterung«, sondern eine Erfindung im wörtlichen Sinn ist wohl das »Sissi-Syndrom«, eine Krankheit, die erstmals 1998 in den Medien auftauchte. Menschen, die darunter

leiden, wurde behauptet, sind aktiv und lebensbejahend, allerdings nur dem Anschein nach. Denn im Grunde sind sie depressiv und damit Kandidaten für Psychopharmaka, wie die legendäre und in dem gleichnamigen Film verewigte österreichische Kaiserin Elisabeth (»Sissi«). Mediziner der Universitätsklinik in Münster, schreibt Blech, haben das benannte und angeblich drei Millionen Menschen quälende Leiden mittlerweile als Schöpfung der Industrie enttarnt.

Der Autor lässt es nicht bei der Aufzählung mehr oder weniger eindrücklicher Beispiele für »neue« Krankheiten bewenden. Er zeichnet vor allem die raffinierten Marketingstrategien nach, mit denen die Gesundheitsindustrie ihre Kunden – Ärzte und ihre Patienten – erreicht. Da werden vermeintlich unabhängige Meinungsforschungsinstitute angeheuert, teure PR- und Werbeagenturen beauftragt, Professoren angesehener Universitäten als Meinungsbildner – bei Insidern »Mietmäuler« genannt – gedungen und Journalisten als unkritische »Multiplikatoren« benutzt. Der enormen Medienpräsenz des genannten Sissi-Syndroms, die von Fachzeitschriften über »Spiegel« und »Stern« bis zur Yellow Press reichte, rühmt sich beispielsweise noch heute eine PR-Firma aus Oberursel auf ihrer Internetseite. Man habe, heißt es dort, eine »neue Depression« etabliert, die mittlerweile von Medizinern und Patienten akzeptiert sei. Zu den Erfolgen des Unternehmens zählt auch ein lanciertes Sachbuch, verfasst von einer Ärztin und Medizinjournalistin und eingeleitet vom Chefarzt einer neurologischen Fachklinik. Bis zu 80 Prozent aller Artikel und Beiträge zu Medizinthemen in den Medien, schreibt Blech, sollen auf eine derart gezielte, von langer Hand geplante Öffentlichkeitsarbeit zurückgehen.

Man sollte das Buch nicht lesen, wenn man wirklich zum Arzt muss. Wer krank ist, braucht nicht noch mehr Beunruhigung, sondern Vertrauen. Aber man sollte das spannend und populär geschriebene Buch lesen, um sich die fließende Grenze zwischen Gesund- und Kranksein zu vergegenwärtigen und sich die kritische Frage zu stellen, ob es klug ist, den Medizinbetrieb allein den Trivialgesetzen des Marktes zu überlassen.

Claudia Eberhard-Metzger

Die Rezensentin ist Biologin und Germanistin. Sie arbeitet als Wissenschaftspublizistin in Maikammer an der südlichen Weinstraße. ◁

Jenseits von Nervenzellen

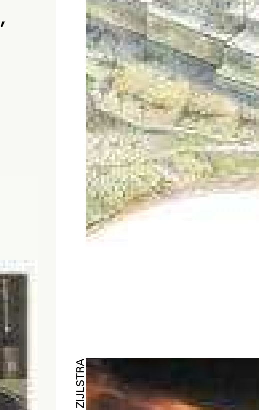
Einsteins Gehirn besaß nicht Nervenzellen im Übermaß, aber Gliazellen. Diese Begleiter wichtiger Gehirnvorgänge scheinen Signalgebung und Lernen in hohem Maße direkt zu steuern

JEFF JOHNSON

WEITERE THEMEN IM SEPTEMBER

Lebensförderndes Methan

Heute sind Methan produzierende Mikroben auf sauerstofffreie Nischen verbannt, aber in der Urzeit der Erde, als die Sonne deutlich schwächer strahlte, sorgten sie für ein lebensfreundliches Klima



JACK UNRUH

Çatal Hüyük – Stadt der Frauen?

Lange galt Çatal Hüyük, eine der ältesten bewehrten Siedlungen der Menschheit, als eine Domäne des Matriarchats. Doch warum zeigen die vielen Bildwerke dann ausschließlich Männer?



FOTO: AIP / ESVA, ILLU: JANA BRENNING

Die Poincaré'sche Vermutung

Es geht um Eigenschaften dreidimensionaler »Flächen« im vierdimensionalen Raum. Ein Rätsel, das Henri Poincaré vor hundert Jahren aufgeworfen hat, scheint endlich gelöst zu sein



ESA / NASA UND A. ZIJLSTRA

Außergewöhnlicher Tod gewöhnlicher Sterne

In fünf Milliarden Jahren wird die Sonne in einem spektakulären Finale verglühen. So wie andere Sterne ihrer Art wird sie sich in eines der schönsten Kunstwerke der Natur verwandeln: in einen Planetarischen Nebel